

Saskia Polster

***Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von
LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für
Beobachterfeldgrößenabhängigkeit***

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018200111

Zuerst als Druckausgabe erschienen:

Polster, Saskia:

Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und
Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit /

Saskia Polster. - Uelvesbüll : Der Andere Verl., 2014. – IV, 230 Seiten.

(Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau ; Nummer 15)

ISBN 978-3-86247-473-8

Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Frau

Dipl.-Ing. Saskia Polster

Tag der Einreichung: 03.07.2013

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 09.12.2013

Erstgutachter: Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz, TU Ilmenau

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker, TU Berlin

Drittgutachter: Dr. rer. nat. Frank Schmid, Diehl Aerospace GmbH

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau. Am Gelingen der Arbeit waren viele Menschen beteiligt, bei denen ich mich in diesem Rahmen herzlich bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Schierz für die Ermöglichung dieser Arbeit, die freundliche, anspornende Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die damit verbundene Möglichkeit, selbstständig zu arbeiten.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung förderte meine Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts „UNILED – Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting“. Durch die Zusammenarbeit der lichttechnischen Institute der TU Berlin, der TU Darmstadt, des Karlsruher Instituts für Technologie und der TU Ilmenau in diesem Projekt fand eine kritische Betrachtung der Arbeit aus allen lichttechnischen Blickwinkeln statt. Besonderer Dank geht an dieser Stelle an Prof. Dr. Völker der TU Berlin für die Übernahme des Koreferats.

Ich bedanke mich außerdem bei der Firma Diehl Aerospace in Nürnberg, insbesondere bei Herrn Hammel, für die freundliche Unterstützung sowie die Bereitstellung der Untersuchungsräume und des Messequipments. Dr. Frank Schmid stand mir immer mit fachlichem Rat zur Seite und unterstützte mich nach Kräften bei der Umsetzung meiner Ideen. Mit zahlreichen anregenden Diskussionen, seinem andauernden Interesse an meiner Arbeit und seiner kritischen Auseinandersetzung mit meinen Versuchsaufbauten hat Nicolaus Kangarakis ganz ausschlaggebend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Steffen Bachmaier ist mir bei jeglichen Programmierproblemen und Hardwarefragen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden. An dieser Stelle sei der gesamten Abteilung „Light & Optics“ für die schöne Zeit, die gute Stimmung und all die kleinen Hilfestellungen gedankt, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meine Kollegen vom Fachgebiet Lichttechnik an der TU Ilmenau standen immer für fachliche Gespräche zur Verfügung. Vielen Dank an Karin Bieske für die kritische Durchsicht meines Entwurfs.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Probanden für ihr Durchhaltevermögen und die vielen netten Stunden im Labor.

Nicht zuletzt bedanke ich mich herzlich bei meinen Eltern für ihr immer offenes Ohr, bei meinen Freunden für die nötige Ablenkung und bei Christoph für sein Verständnis, seine Gelassenheit und dafür, dass er immer für mich da ist.

Saskia Polster

Kurzfassung

Durch die Einführung der LED (Light Emitting Diode) als gängiges Leuchtmittel in der Innenraumbeleuchtung ergeben sich neue Anforderungen an die Charakterisierung von Lichtquellen. Zum einen zeigen sich durch die Spektralverteilungen von LEDs Unzulänglichkeiten in der Modellierung der Farbwahrnehmung durch die standardisierten Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964. Zum anderen wird mit dem Einsatz von LEDs die Anzahl der Leuchtmittel, die gemeinsam ein Beleuchtungssystem bilden, deutlich größer. Damit wird eine genaue Charakterisierung der Eigenschaften der einzelnen Lichtquellen besonders wichtig, um eine korrekte Ansteuerung der einzelnen Leuchteinheiten zu ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst die Modellierung der Farbwahrnehmung bei LED-Lichtquellen durch bestehende Spektralwertfunktionen untersucht. Die Ergebnisse bestätigen, dass zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren teilweise deutliche messtechnische Farbdifferenzen bestehen. Mit Hilfe einer Datenbasis visuell gleich wahrgenommener LED-Spektren aus Abgleichuntersuchungen und auf Basis der Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE-Empfehlung CIE2006 wurden neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° entwickelt. Mit diesen Spektralwertfunktionen können LED-Lichtquellen korrekt bewertet werden. Die Eignung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° bzw. 2006-TUIL-10° für die Ermittlung visuell gleich wahrgenommener Spektren konnte mit Hilfe von Farbdifferenzbewertungen an acht Farbörtern mit neun unterschiedlichen Spektralvergleichen validiert werden.

Aus den Abgleichuntersuchungen wurde deutlich, dass die Beobachterfeldgröße einen großen Einfluss auf die Farbwahrnehmung hat. Bei der Beleuchtung einer größeren Fläche werden die einzelnen LED-Beleuchtungsmodule immer unter verschiedenen Beobachterfeldgrößen betrachtet. Mit dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit konnte ein Index eingeführt werden, der beschreibt wie groß die Farbdifferenz zwischen zwei vormals metameren Spektren sein wird, wenn lediglich die Beobachterfeldgröße geändert wird, unter der diese beobachtet werden. Mit diesem Index lassen sich Spektren auf ihre Kompatibilität für die Verwendung in einer gemeinsamen Beleuchtungsanwendung testen. Die Aussagekraft des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit konnte mit Hilfe von Farbdifferenzbewertungen bestätigt werden.

Abstract

The implementation of LEDs (Light Emitting Diodes) as standard illuminants for lighting applications entails new demands on the characterization of light sources. Firstly, the spectral power distributions of LEDs reveal deficiencies in the colour matching functions of the CIE standard observer from 1931 and 1964. Secondly, with LEDs the number of light sources used to form a lighting system is strongly increased. Therefore the exact characterization of every single light source becomes very important in order to ensure the correct control of the lighting units.

This thesis investigates the abilities of existing colour matching functions of the CIE to model human colour perception when LED spectra are concerned. The results show large colour differences between visually matched spectra when CIE standard observers are used for the calculation of colour coordinates. By means of side-by-side colour matching experiments, a database of visually matching spectra was established. Based on this database and on the cone fundamentals of the CIE recommendation CIE170-1:2006, new colour matching functions (2006-TUIL-2°/10°) were developed. With these colour matching functions the colour appearance of LED-spectra can be assessed correctly. It was shown that with the new colour matching functions (2006-TUIL-2°/10°) it is possible to predict visual colour matches by conducting colour difference evaluations at eight different colour coordinates using nine different spectral power distributions.

The results of the colour matching experiments revealed a rather large influence of the observer field size on the colour perception. In practice an illuminated area lit by a pair of different LED-lighting-units is usually observed under differing field sizes; for instance when the observer changes his position in the room. With the metamerism-index for field size independence an index was introduced that indicates how large the colour difference between two formerly metamere spectra will be when the observer field size changes. With this index different spectral power distributions can be tested for their compatibility to be used in the same lighting system. The validity of the metamerism-index for field size independence was confirmed by colour difference evaluations.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Geschichte der Modellierung der Farbwahrnehmung | 1 |
| 1.2 | Entwicklungen in der Flugzeugkabinenbeleuchtung | 2 |
| 1.3 | Zielstellung | 4 |
| 1.4 | Aufbau der Arbeit | 5 |
| | | |
| 2 | Farbwahrnehmung und Bewertungsfunktionen | 9 |
| 2.1 | Das Auge | 9 |
| 2.1.1 | Vom Eintritt des Lichts ins Auge bis zum Farbreiz | 10 |
| 2.1.2 | Ursachen für die unterschiedliche Farbwahrnehmung von Beobachtern | 11 |
| 2.2 | Entwicklung der CIE Normspektralwertfunktionen | 13 |
| 2.2.1 | Trichromatische Farbabgleiche | 14 |
| 2.2.2 | Maxwell-Methode | 14 |
| 2.2.3 | Maximum-Saturation-Methode | 15 |
| 2.2.4 | Normspektralwertfunktionen CIE1931 | 16 |
| 2.2.5 | Normspektralwertfunktionen CIE1964 | 18 |
| 2.3 | Entwicklung neuer Spektralwertfunktionen | 20 |
| 2.3.1 | Die Empfehlung CIE170-1:2006 | 20 |
| 2.3.2 | Transformationsmatrizen | 23 |
| 2.3.3 | Neueste Entwicklungen an der Universität von Pannonia | 24 |
| 2.4 | Farbwahrnehmung und Beobachterfeldgröße | 25 |
| 2.5 | Einflussfaktoren auf die Farbwahrnehmung außerhalb der Er- fassung der Spektralwertfunktionen | 26 |
| 2.6 | Die UCS-u'v'-Farbtafel und Wahrnehmungsschwellen | 28 |
| 2.7 | Metamerie und Metamerie-Index | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Methodik und Versuchsaufbau | 33 |
| 3.1 | Untersuchungsmethoden | 33 |
| 3.2 | Versuchsaufbau | 34 |
| 3.3 | Lichtquellen | 38 |
| 3.3.1 | Lichtquellen TLR und TLG | 38 |
| 3.3.2 | Umgebungsbeleuchtung | 40 |
| 3.3.3 | 8-LED-Lichtquelle | 40 |
| 3.3.4 | Ansteuerung der Testlichtquelle durch den Probanden . | 41 |
| 3.3.5 | Farbmischalgorithmus | 43 |
| 3.4 | Versuchsszenarien | 45 |
| 3.5 | Lichtfarben | 49 |
| 3.6 | Probandengruppe | 50 |
| 3.7 | Beobachterfeldgröße | 51 |
| 3.8 | Ergebnisschema und statistische Datenauswertung | 53 |
| 3.8.1 | Farbabgleichversuche | 53 |
| 3.8.1.1 | Statistische Kennwerte | 56 |
| 3.8.1.2 | Boot-Strap-Verfahren | 56 |
| 3.8.1.3 | Mahalanobis-Ellipsen | 57 |
| 3.8.1.4 | Testverfahren | 59 |
| 3.8.2 | Farbdifferenzbewertungen | 60 |
| 3.8.2.1 | Wilcoxon-Test | 61 |
| 3.8.2.2 | Rangkorrelation | 61 |
| 4 | Neue Spektralwertfunktionen für das 2°- und 10°-Beobachterfeld | 63 |
| 4.1 | Side-by-Side Abgleichversuche | 63 |
| 4.1.1 | Versuchsdurchführung | 64 |
| 4.1.1.1 | Versuchsbedingungen | 64 |
| 4.1.1.2 | Versuchsablauf | 66 |
| 4.1.2 | Abgleichergebnisse | 68 |
| 4.1.2.1 | Darstellung mit Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 | 68 |
| 4.1.2.2 | Darstellung mit Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 | 83 |
| 4.1.2.3 | Darstellung mit Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE von 2006 | 85 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1.2.4 | Neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL . . . | 89 |
| 4.1.3 | Weitere Einflussfaktoren | 95 |
| 4.1.3.1 | Einfluss der Helligkeit | 95 |
| 4.1.3.2 | Scheinbare Inhomogenität der Bewertungsfläche | 97 |
| 4.1.3.3 | Einfluss des Ortes der Referenzlichtquelle . . . | 98 |
| 4.1.4 | Diskussion der Ergebnisse der Side-by-Side Abgleich- versuche | 100 |
| 4.2 | Wahrnehmbarkeit der Verbesserung | 105 |
| 4.2.1 | Versuchsbedingungen | 106 |
| 4.2.2 | Versuchsablauf | 107 |
| 4.2.3 | Ergebnisse | 109 |
| 4.2.4 | Diskussion | 113 |
| 4.3 | Validierung der neuen Kurven an anderen Farbörtern | 118 |
| 4.3.1 | Versuchsbedingungen | 118 |
| 4.3.2 | Versuchsablauf | 120 |
| 4.3.3 | Ergebnisse | 120 |
| 4.3.4 | Diskussion | 124 |
| 4.4 | Fazit: Neue Spektralwertfunktionen | 124 |
| 5 | Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit | 129 |
| 5.1 | Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung . . | 130 |
| 5.2 | Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit | 134 |
| 5.2.1 | Direkte Berechnung | 134 |
| 5.2.2 | Berechnung über Differenzspektrum | 136 |
| 5.2.3 | Diskussion - Interpretation des Index | 142 |
| 5.3 | Validierung des neuen Index im Experiment | 145 |
| 5.3.1 | Versuchsbedingungen | 145 |
| 5.3.2 | Versuchsablauf | 146 |
| 5.3.3 | Ergebnisse | 147 |
| 5.3.4 | Diskussion | 148 |
| 5.4 | Fazit: Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit . | 150 |
| 6 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 153 |
| | ANHANG | 161 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| Abbildungsverzeichnis | 207 |
| Tabellenverzeichnis | 211 |
| Abkürzungen und Symbole | 215 |
| Literaturverzeichnis | 223 |

1 Einleitung

1.1 Geschichte der Modellierung der Farbwahrnehmung

Seit über 200 Jahren beschäftigt sich der Mensch mit der Farbe und der theoretischen Beschreibung der Farbwahrnehmung des Menschen. Die Farbmesskunst kann als Teilgebiet sowohl der Sinnesphysiologie wie auch der Experimentalphysik angesehen werden [Sch20]. Anfangs beschäftigten sich vor allem Physiker wie Maxwell, Helmholtz, Schrödinger, Judd, Wright und viele mehr damit, Farbe messtechnisch zu erfassen. Lange Zeit existierten zwei konkurrierende Modelle der Farbtheorie. Die trichromatische Farbtheorie nach Young [You02] und Helmholtz [Hel52] wurde als absolut gegensätzlich zur Gegenfarbtheorie von Hering [Her20] gesehen. Bald beschäftigte man sich aber auch in der physiologischen Forschung mit der Farbwahrnehmung. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der neurobiologischen und -chemischen Forschung können viele Bereiche der Farbtheorie mit neuronalen Verarbeitungsschritten der Farbwahrnehmung in der Retina und dem visuellen Cortex erklärt werden. Heute weiß man, dass die beiden Modelle der Farbtheorie lediglich das Farbsehen auf unterschiedlichen Verarbeitungsebenen beschreiben.

Bereits 1860 beschäftigte sich Maxwell [Max60] mit der Erfassung der Farbwahrnehmung mittels spektraler Empfindlichkeitsfunktionen. Entsprechend der trichromatischen Farbtheorie ging er davon aus, die Farbwahrnehmung mit Hilfe von drei Funktionen modellieren zu können. Damit begann die Ära der psychooptischen Untersuchungen im Bereich der Farbmetrik. Mit der Veröffentlichung der Normspektralwertfunktionen der Commission Internationale de l'Eclairage, CIE, von 1931 [CIE31] wurde der Grundstein für die weltweit standardisierte mathematische Erfassung der menschlichen Farbwahrnehmung gelegt. Schon damals wäre das System der Normspektralwert-

funktionen von 1931 beinahe am Widerstand der damaligen amerikanischen Normungsinstitute gescheitert. Diese waren zunächst der Meinung, dass das neue System keinen Vorteil gegenüber den bestehenden Systemen bringen würde, da diese die damals relevanten Probleme der Farbbeschreibung ausreichend abdecken würden [Wri07]. Es wurde nie davon ausgegangen, dass die Forschung im Bereich der Farbwahrnehmungsmodellierung abgeschlossen war. Man ging lediglich immer davon aus, dass die praktische Anwendung zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht zwingend nach einer genaueren Beschreibung verlangte. Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch, dass technologische Neuerungen eine Anpassung der Standards erforderlich machen können. In der heutigen Zeit wird eine Durchsetzung neuer Modelle als Standard noch schwieriger, da hinter der Farbmessstechnik inzwischen ein starker Wirtschaftszweig steht. Neue Standards bedeuten für diese Industrien häufig hohe Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionskosten. Trotz allem besteht die Notwendigkeit, diese Hemmnisse zu überwinden und die höheren Anforderungen neuer Technologien an die Standards ernst zu nehmen.

1.2 Entwicklungen in der Flugzeugkabinenbeleuchtung

Die Entwicklung in der Flugzeugkabinenbeleuchtung geht dahin, dass die herkömmlichen Leuchtmittel, wie Leuchtstofflampen, in naher Zukunft größtenteils von neuen Beleuchtungskonzepten auf Basis von LED-Beleuchtungssystemen ersetzt werden. Für den Einsatz der LED als bevorzugtes Leuchtmittel in der Flugzeugkabine gibt es mehrere Gründe, die sich aus dem starken Wachstum des Flugsektors ergeben. Einerseits wollen Passagiere zu immer günstigeren Preisen weite Strecken zurück legen. Um dies zu gewährleisten, müssen die Flugzeugbetreiber enger kalkulieren. Die Zeit, die ein Flugzeug für Wartungszeiten am Boden verbringt, kostet Geld. Die Wartung der Maschinen muss daher deutlich schneller gewährleistet werden, um diesen Kostenfaktor zu minimieren. Hier findet die LED-Technologie ihren Ansatzpunkt, da die LED eine deutlich höhere Lebensdauer als die herkömmlich verwendeten Leuchtstofflampen aufweist. Andererseits verlangt die Globalisierung Firmen und deren Angestellten eine deutlich größere Reisebereitschaft ab.

Dabei wird häufig erwartet, dass der Reisende ohne Erholungsphase direkt aus dem Flugzeug an den Verhandlungstisch tritt. Daher steigt der Anspruch an den Reisekomfort in der Kabine. Dies beinhaltet die Forderung nach einer stimmigen Beleuchtung, die neben ausreichender Sehleistung auch eine angenehme Atmosphäre liefert und das Wohlbefinden steigert. Erste Forschungen gehen dahin die innere biologische Uhr der Fluggäste auf die Zeit des Ziellandes einzustellen. Um dies zu gewährleisten muss die Lichtquelle ein Spektrum besitzen, dessen Verteilung sich innerhalb bestimmter Grenzen anpassen lässt und deren Farbort innerhalb eines bestimmten Gamuts frei einstellbar ist. Aufgrund der schnellen Schaltzeiten mit geringen Abnutzungserscheinungen, der vielfarbigen Ausführungen und der kleinen Bauform bietet sich die LED bei diesen Anforderungen als ideales Leuchtmittel an.

Mit der neuen Technologie steigen auch die Ansprüche der Nutzer an die homogene Ausleuchtung der Kabine. Wurde es bei der Beleuchtung mit Leuchtstofflampen noch akzeptiert, dass die einzelnen Leuchten visuell differenzierbar waren, so geht der Wunsch der Designer beim Einsatz der LED-Technologie dahin, die gesamte Länge einer Flugzeugkabine mit einem durchgängigen Leuchtband illuminieren zu können. Dieses ist aber aus einer Vielzahl an einzelnen Leuchtmitteln zusammengesetzt. Daher liegt die Herausforderung bei der Beleuchtung von großen homogen ausgeleuchteten Flächen darin, jedes einzelne Leuchtmittel sehr genau charakterisieren zu können. Erst durch eine genaue Bestimmung der photometrischen und colorimetrischen Eigenschaften lässt sich die Masse der verwendeten Leuchtmittel kontrollieren und damit der gewünschte visuelle Effekt erzielen. Unter Verwendung der herkömmlichen Farbmessinstrumente, die in der Regel mit den Normspektralwertfunktionen der CIE 1931 arbeiten, ist es nicht möglich, dies ausreichend genau zu realisieren. Wird die Flugzeugkabinenwand messtechnisch erfasst, zeigen sich die Farbkoordinaten als absolut homogen. Bei visueller Betrachtung werden aber deutliche Farbflecken beobachtet, die durch die Messtechnik nicht erfasst werden. Die Spektren der LED-Lichtquellen bringen Unzulänglichkeiten der Normspektralwertfunktionen zum Vorschein. Die bisher nur in Laboruntersuchungen, z.B. von Bieske [BCS07] und Csuti [CS08] [CSP⁺11], ermittelten Diskrepanzen zwischen messtechnischer Erfassung und visueller Bewertung der Lichtfarben von LED-Lichtquellen werden damit in der praktischen Anwendung bestätigt.

1.3 Zielstellung

Mit der Verwendung der LED in breiten Anwendungen der Innenraumbeleuchtung hat sich eine neue Technologie durchgesetzt, die von den bestehenden Standards nicht zufriedenstellend erfasst wird. Um die farbmétrischen Charakteristika von LEDs genau erfassen zu können und damit eine exakte Ansteuerung dieser Lichtquellen zu gewährleisten, bedarf es einer genaueren Betrachtung der Modellierung der Farbwahrnehmung von LED-Spektren durch Spektralwertfunktionen.

Das Ziel dieser Arbeit besteht daher zunächst darin abzuschätzen, wie groß die Fehler in der Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren auf denselben Farbtort unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 für die Bewertung von LED-Lichtquellen sind. Zu diesem Zweck werden visuelle Abgleichuntersuchungen durchgeführt, bei denen Probanden unterschiedliche LED-Lichtquellen mit verschiedenen Spektralverteilungen aufeinander abgleichen. Als Ergebnis werden Farbdifferenzen zwischen den Farbörtern der beiden Vergleichsspektren erwartet, die die Farbraumfehler unter Verwendung der untersuchten Spektralwertfunktionen darstellen. Je größer die ermittelten Farbdifferenzen sind, desto schlechter lässt sich die Farbwahrnehmung bei LED-Lichtquellen mit diesem System modellieren. Da die unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für konkrete Beobachterfeldgrößen ermittelt wurden, sollen auch hier die typischen Beobachterfeldgrößen 2° und 10° getrennt untersucht werden. Schließlich sollen alle bekannten Spektralwertfunktionen mit Hilfe der ermittelten Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren getestet werden. Als Endziel gilt es, Spektralwertfunktionen zu ermitteln, mit denen visuell gleich wahrgenommene Lichtfarben auf denselben Farbtort abgebildet werden.

Zudem gilt es Bewertungskriterien festzulegen, die erfüllt werden müssen, um farblich homogene Flächenbeleuchtungen, wie beispielsweise in der Flugzeugkabine, bei hinterleuchteten Wänden oder Medienfassaden, mit LED-Lichtquellen zu realisieren. Aufgrund der Produktionsweise von LEDs werden in einem Beleuchtungssystem immer LEDs mit mehr oder weniger unterschiedlichen Spektren verwendet. Die beleuchtete Fläche soll aus jeder Betrachtungsentfernung und unter jedem Betrachtungswinkel denselben vi-

suellen Farbeindruck beim Betrachter hervorrufen. Um dies zu gewährleisten, dürfen die verwendeten Spektren ihren Farbeindruck unter unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen nicht unabhängig voneinander ändern. Um eine Maßzahl für die Kompatibilität zweier Spektren zu erhalten, soll ein Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit eingeführt werden. Mit diesem soll rechnerisch bestimmt werden können, wie gut sich zwei LED-Systeme dafür eignen, gemeinsam in einem Beleuchtungssystem verwendet zu werden. Der eingeführte Index soll mit visuellen Farbdifferenzbewertungen validiert werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Dieses Kapitel fasst die Inhalte der einzelnen Kapitel der vorgelegten Arbeit in einer kurzen Vorschau zusammen. In Kapitel 2 wird der Stand der Wissenschaft erfasst. Kapitel 3 stellt die verwendete Methodik und den Versuchsaufbau vor. Die Beschreibung der Versuche und Untersuchungsergebnisse ist in zwei Bereiche mit getrennten Schwerpunkten aufgeteilt. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Erfassung der Farbwahrnehmung mittels Spektralwertfunktionen, während in Kapitel 5 der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung genauer beleuchtet wird und ein Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit vorgestellt wird. Beide Themenbereiche werden mit denselben Methoden und demselben Versuchsaufbau aus Kapitel 3 untersucht.

Kapitel 2: Farbwahrnehmung und Bewertungsfunktionen

Um ein besseres Verständnis der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen, werden in Kapitel 2 die physiologischen Gegebenheiten des Auges und deren Einfluss auf die Farbwahrnehmung umrissen. Zudem können manche Ergebnisse aus Untersuchungen zur Farbwahrnehmung nur im Kontext mit anderen aktuellen Forschungsergebnissen korrekt interpretiert werden. Daher gibt Kapitel 2 einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Farbwahrnehmung auf physiologischer Ebene und im Bereich der Erfassung der Farbwahrnehmung mittels Spektralwertfunktionen.

Kapitel 3: Methodik

Für die Untersuchungen zur Farbwahrnehmung mittels Farbabgleichuntersuchungen und Farbdifferenzbewertungen in den entsprechenden Beobachterfeldgrößen wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt. Dieser wird in Kapitel 3 beschrieben. Mit den Untersuchungsmethoden werden die verwendeten visuellen Abgleichtests und Farbdifferenzbewertungen vorgestellt. Außerdem werden die einzelnen Testlichtquellen und die untersuchten Versuchsszenarien beschrieben, in denen unterschiedliche Spektralvergleiche zum Einsatz kommen. Zudem wird auf die Wahl der untersuchten Lichtfarben und Testbedingungen eingegangen. Die Ansteuerung der Testlichtquelle wird kurz erläutert. Am Ende dieses Kapitels werden das Ergebnisschema und die statistischen Methoden zur Beschreibung der Ergebnisse aus den Farbabgleichversuchen und Farbdifferenzbewertungen vorgestellt.

Kapitel 4: Neue Spektralwertfunktionen für das 2°- und 10°-Beobachterfeld

In Kapitel 4 werden die Untersuchungen zur Ermittlung neuer Spektralwertfunktionen für ein 2°- und 10°-Beobachterfeld beschrieben, die unter anderem auch für die Erfassung von LED-Lichtquellen geeignet sind. Zunächst wird auf eine Reihe von Abgleichversuchen eingegangen, mit deren Hilfe eine Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren aufgebaut wird. Diese Datenbasis beruht auf Abgleichen bei unterschiedlichen Farbörtern unter Verwendung unterschiedlicher Spektralverteilungen. Mit Hilfe dieser Datenbasis werden zunächst die bestehenden Spektralwertfunktionen auf ihre Fähigkeit geprüft, visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbort abzubilden. Die Farbdifferenz im $u'v'$ -Farbraum, basierend auf den entsprechenden Spektralwertfunktionen, ist als Farbraumfehler zu interpretieren. Basierend auf den Spektralwertfunktionen der CIE 2006 werden neue Spektralwertfunktionen entwickelt, mit deren Hilfe die Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren aus der Datenbasis auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle gebracht werden können. Die anschließend beschriebenen Farbdifferenzbewertungen dienen dazu zu testen, ob die rechnerisch signifikante Verringerung der Farbraumfehler tatsächlich zu einer verbesserten Modellierung der Farbwahrnehmung bei LED-Lichtquellen führt. Dazu werden sowohl die Farbörter aus den Abgleichuntersuchungen

als auch fünf unabhängige Farbörter im gesättigten Bereich des Farbraums untersucht.

Kapitel 5: Einführung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

Kapitel 5 geht auf den Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung ein. Zunächst wird mit Hilfe der in Kapitel 4 beschriebenen Datenbasis ermittelt, wie groß die Farbdifferenzen sind, die zwischen zwei vormals visuell gleich wahrgenommenen Spektren entstehen, wenn die Beobachterfeldgröße geändert wird. Dann wird ein neuer Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit eingeführt. Dieser sagt aus, wie stark zwei zu vergleichende LED-Systeme bezüglich ihres Farbabstandes auf eine Beobachterfeldgrößenänderung reagieren werden. Zwei unterschiedliche Rechenmethoden zur Ermittlung des Index werden vorgestellt. Des weiteren wird eine Untersuchung mit Farbdifferenzbewertungen beschrieben, mit der der Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit auf Korrelation mit den tatsächlich wahrgenommenen Farbdifferenzen getestet wird. Damit soll die Anwendbarkeit des Index nachgewiesen werden.

Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel 6 fasst die erzielten Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick darauf, in welchen Bereichen weitere Forschung von besonderer Relevanz ist. Zudem wird hier aufgezeigt, wie die Ergebnisse in der Praxis sinnvoll angewendet werden sollten und welche Vorteile sich daraus ergeben.

2 Farbwahrnehmung und Bewertungsfunktionen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Farbwahrnehmung im Allgemeinen und mit der Erfassung der visuellen Reizantwort des Menschen auf Farbreize mit Hilfe von Spektralwertfunktionen im Speziellen. Zudem wird der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung genauer untersucht. Daher soll in diesem Kapitel in aller Kürze der aktuelle Stand der Wissenschaft der nachfolgend gelisteten Punkte erfasst werden:

- Das Auge als Sinnesorgan mit allen Elementen, die die Farbwahrnehmung beeinflussen und unter anderem zu Variationen in der Farbwahrnehmung unterschiedlicher Beobachter führen.
- Bisherige Versuche einer Erfassung der Farbwahrnehmung mit Hilfe von Spektralwertfunktionen.
- Einfluss-Faktoren auf die Farbwahrnehmung außerhalb der Beschreibbarkeit von Spektralwertfunktionen, wie chromatische Adaptation, Farbkonstanz, Gegenfarben-Überhöhung, Umgebungseffekte, etc.
- Der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung.
- Die Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen.
- Metamerie und Metamerie-Indizes.

2.1 Das Auge

Seit langem versuchen Forscher und Wissenschaftler den Farbreiz, der von Objekt- oder Lichtfarben ausgelöst wird, mathematisch zu beschreiben. Das Auge ist allerdings ein sehr sensibler und komplexer Sensor. Zahlreiche Schritte sind zu beachten auf dem Weg vom Lichtspektrum vor dem Auge bis hin

zum wahrgenommenen Farbreiz. In diesem Kapitel soll der grundlegende physiologische Aufbau des Auges dargelegt werden.

2.1.1 Vom Eintritt des Lichts ins Auge bis zum Farbreiz

Will man die Sinneswahrnehmung, die durch ein Lichtspektrum hervorgerufen wird, modellieren, nimmt man als Eingangsspektrum jenes, welches vor dem Eintritt in das Auge gemessen werden kann. Wobei darauf zu achten ist, dass die Spektralmessung so erfolgt, dass tatsächlich die Spektralzusammensetzung gemessen wird, die später ins Auge einfällt. Bereits das von den Rezeptoren im Auge bewertete Spektrum unterscheidet sich von diesem. Abbildung 2.1 illustriert den Weg des Lichts durch das Auge bis hin zu den Photosensoren. Zunächst durchdringt das Licht die unterschiedlichen Augenmedien. Dabei wird das Spektrum durch die spektralen Transmissionsgrade der Hornhaut, der Linse, des Glaskörpers und des Makulapigments in einigen Wellenlängenbereichen abgeschwächt [SS99] (S.60) [Sto04] (S.215). Innerhalb

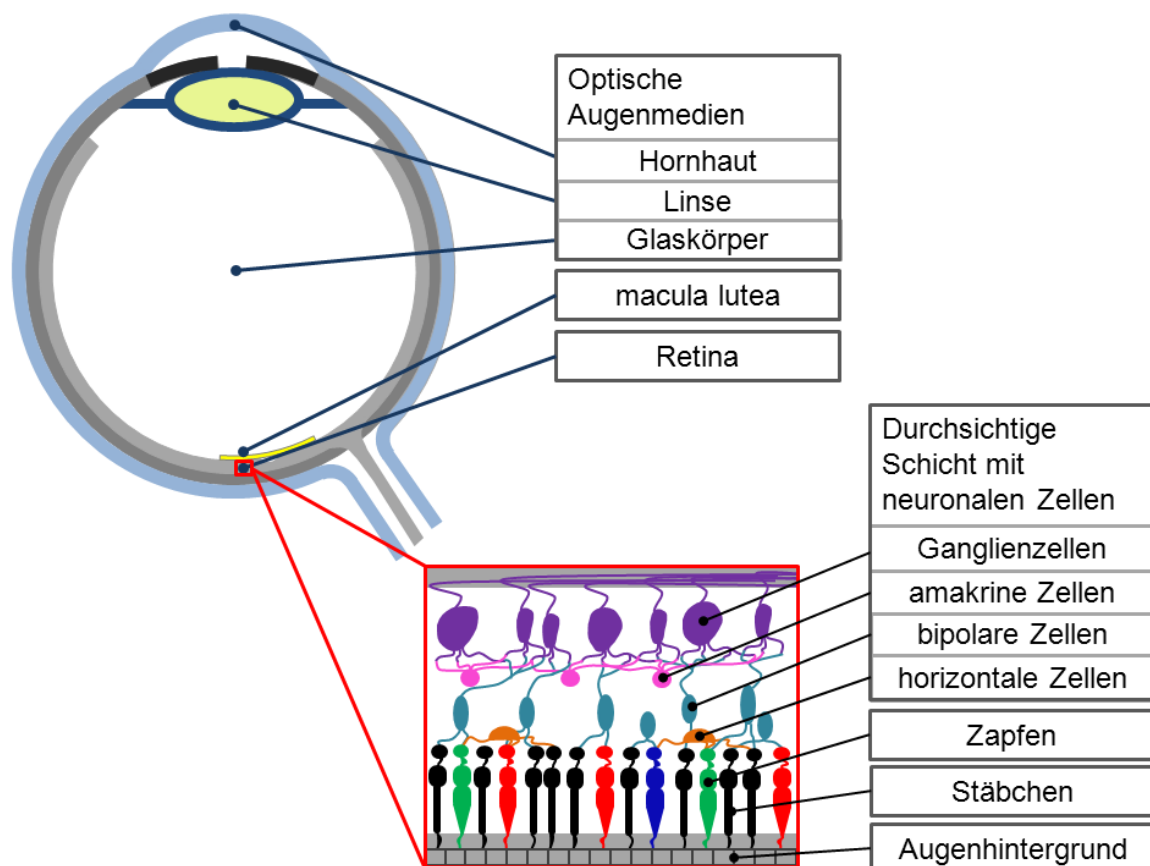


Abbildung 2.1 – Weg des Lichts durch das Auge.

der Retina muss das Licht zunächst durch die Schichten mit den Ganglienzellen, horizontalen Zellen, bipolaren Zellen und amakrinen Zellen dringen [Zol99] (S.84), bis es schließlich von den Zapfen oder Stäbchen absorbiert werden kann. Das Spektrum, das schließlich an den Rezeptoren in der Retina ankommt, ist also bereits ein anderes als jenes, das sich messtechnisch erfassen lässt. Die Empfindlichkeiten der einzelnen Zapfen liegen im Bereich kurzer (short-‘S’), mittlerer (middle-‘M’) und langer (long-‘L’) Wellenlängen. Stockman und Sharpe [SS00] ermittelten für den spektralen Absorptionsgrad der Zapfepigmente Maxima bei 420,7 nm, 530,3 nm und 558,9 nm. Das Modell der Farbwahrnehmung auf Zapfenebene entspricht dem Modell der trichromatischen Farbwahrnehmung von Young, Helmholtz und Maxwell [SSJN99]. Ist das Photon erstmal vom Zapfen absorbiert worden, geht jegliche Information über die Energie des Photons verloren. Die Zapfen fungieren lediglich als Photonen-zähler. Nachdem die Photopigmente in den Zapfen das Licht absorbiert haben, geht die Verarbeitung des Farbsignals in der Retina auf neuronaler Ebene weiter. Die unterschiedlichen neuronalen Zelltypen verarbeiten die Zapfensignale in der zweiten Ebene der Farbverarbeitung durch Gegenversaltungen der Zapfensignale weiter [Wri75] (S.156) [Fai05]. In dieser Ebene findet neben einer Gegenfarbverarbeitung auch eine Zusammenschaltung mehrerer Zapfensignale auf einzelne Ganglienzellen statt [Kol03]. Neuere Forschungen zur Verarbeitung der Zapfensignale auf neuronaler Ebene beinhalten unterschiedliche Theorien zu einer dritten Signalverarbeitungsebene. De Valois und De Valois [DVDV93] [DVDV95] propagieren ein erweitertes Modell einer Farbdifferenzverschaltung auf der Ebene der Ganglienzellen, bei dem das Blau-Gelb-Differenzsignal zu einem großen Teil vom M-Zapfensignal bestimmt wird. Einige Phänomene wie farbige Nachbilder und im allgemeinen das Verständnis von komplementären Farben lassen sich nach Wu [Wu09] und Pridmore [Pri11] durch weitere Gegenversaltungen der Farbdifferenzsignale im visuellen Kortex erklären.

2.1.2 Ursachen für die unterschiedliche Farbwahrnehmung von Beobachtern

Die Einflussfaktoren, die die individuellen Unterschiede in der Farbwahrnehmung zwischen verschiedenen Beobachtern hervorrufen, sind die Linse

und die Schicht des Makulapigments die in ihrer Schichtdicke und Dichte variieren. Außerdem variiert die axiale optische Dichte des Photopigments im äußeren Segment der Rezeptoren von Individuum zu Individuum. Eine höhere Dichte des Photopigments bedingt eine Verflachung der spektralen Zapfen-Empfindlichkeitskurve [SS99] (S.54) [WM88] [SPS76]. Zudem variiert von Beobachter zu Beobachter das Maximum der spektralen Absorptionsdichte der Zapfenpigmente und auch die Anzahl und Verteilung der unterschiedlichen Zapfenarten in der Retina.

- Die gelblich gefärbte Linse absorbiert vor allem Licht im Bereich kurzer Wellenlängen. Der maximale spektrale Absorptionsgrad der Linse variiert bereits bei jungen Beobachtern (ca. 30 Jahre) um $\pm 25\%$ [BS09]. Der spektrale Absorptionsgrad der Linse ist zudem stark altersabhängig. Mit zunehmendem Alter gelangt immer weniger blaues Licht ins Auge.
- Die macula lutea befindet sich als eine Art Filter im Bereich der Fovea und enthält das Makulapigment, welches vor allem Spektralanteile im Bereich kurzer Wellenlängen absorbiert. Zum einen variiert die Schichtdicke der Makulaschicht und zum anderen die optische Dichte des Makulapigments. Die maximale optische Dichte des Makulapigments liegt bei 460 nm und variiert zwischen unterschiedlichen Beobachtern stark in ihrer maximalen optischen Dichte von 0,0 bis zu 1,2 [BS09].
- Die optische Dichte des Photopigments ist abhängig vom Absorptionsgrad des Zapfenpigments selbst, der Länge des äußeren Zapfensegments und von der Konzentration des Zapfenpigments im äußeren Zapfensegment. Die optische Dichte des Photopigments variiert deutlich zwischen den Beobachtern und kann auch innerhalb eines Beobachters stark variieren. Mit zunehmendem Abstand zur Fovea nimmt die Länge der äußeren Zapfensegmente ab und damit auch die optische Dichte des Photopigments [SS99]. Die Forschungsergebnisse zur Bestimmung der Photopigmentdichte gehen je nach Messmethode weit auseinander, mit optischen Dichten von 0,3 bis 1,0 für L und M-Zapfenpigmente und 0,2 bis 0,3 für S-Zapfenpigmente [SS99]. Stockman und Sharpe [SS99] gehen von mittleren maximalen optischen Dichten der Photopigmente von 0,50, 0,50 und 0,40 für die L-, M-, und S-Zapfen für ein 2° -Beobachterfeld aus. Für ein 10° -Beobachterfeld legen sie mittlere maximale optische

Dichten der Photopigmente von 0,38, 0,38 und 0,30 für die L-, M- und S-Zapfen zugrunde.

- Ein weiterer Unterschied zwischen Beobachtern ist die Peakwellenlänge der spektralen Absorptionsgrade der Zapfenpigmente. Für die Absorptionsgrade der L- und M-Zapfenpigmente wurde eine Genotyp-abhängige Verschiebung der maximalen Zapfenempfindlichkeit um mehrere Nanometer festgestellt. Die Streuung der maximalen S-Zapfenempfindlichkeit wird von Stockman und Sharpe [SS99] mit einer Standardabweichung von 1,5nm angegeben. In ihrer Untersuchung zur S-Zapfenempfindlichkeit stellten Stockman und Sharpe [SSF99] fest, dass es scheinbar auch für die S-Zapfenempfindlichkeit zwei Gruppen von Beobachtern gibt, deren Peak-Empfindlichkeit um 2,7 nm verschoben ist. Damit ergibt sich eine Verschiebung der Peakwellenlängen der S-Zapfenempfindlichkeit von etwa 417 nm zu 420 nm. Die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Rechenmethoden für die Anpassung der Funktionen an die Datensätze visuell gleich wahrgenommener Spektren liefern ebenso eine um 2,7 nm verschobene S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion [SS00].

Bedingt durch die spektralen Transmissionsgrade der einzelnen Komponenten, treten die Unterschiede in der Farbwahrnehmung von Beobachtern bei bestimmten Spektralverteilungen besonders stark hervor. Bei der farblich homogenen Flächenbeleuchtung besteht das Ziel darin für alle Beobachter ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen. Daher wird in dieser Arbeit der Zusammenhang zwischen dem Maß der Interbeobachterstreuung und der verwendeten Spektralverteilung genauer untersucht.

2.2 Entwicklung der CIE Normspektralwertfunktionen

Das System der Spektralwertfunktionen basiert auf der Annahme, dass jedes farbmimetrische System dreidimensional sein muss. Dies beruht auf der Tatsache, dass ein Photon einer bestimmten Wellenlänge mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen der drei Zapfen anregt; die Wellenlänge des Photons danach aber keinerlei Einfluss hat. Diese Information geht also verloren. Erst durch den Vergleich der Information aus allen drei Zapfenarten nehmen Farb-

normalsichtige einen Farbeindruck wahr [BS09]. Mit der Entwicklung spektraler Empfindlichkeitsfunktionen zur Modellierung der Zapfenempfindlichkeiten im Auge soll der durch ein bestimmtes Spektrum hervorgerufene Farbeindruck mathematisch beschrieben werden.

2.2.1 Trichromatische Farbabgleiche

Die trichromatische Theorie geht davon aus, dass jeder Farbreiz aus einer Kombination von drei entsprechenden anderen Farbreizen ermischt werden kann. Zudem wird vom Grundsatz der Additivität ausgegangen, der besagt, dass eine Mischung zweier Reize, die auf die zuvor beschriebene Art und Weise abgeglichen wurden, der Überlagerung aus den beiden Abgleichkombinationen entspricht [Wri46]. Das Farbabgleichverhalten eines Individuums kann demnach genau erfasst werden, indem man die Intensitäten von drei unabhängigen Primärquellen ermittelt, die benötigt werden, um eine monochromatische Lichtquelle visuell abzugleichen; wobei die monochromatische Referenzlichtquelle einmal durch den gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums verschoben wird. Als unabhängig werden Primärquellen bezeichnet, bei denen sich keine der Primärquellen durch eine Kombination der anderen beiden Primärquellen darstellen lässt [Sto04]. Auf dieser Grundlage lassen sich mit Hilfe von Abgleichtests, bei denen Probanden zwischen zwei Testflächen absolute visuelle Gleichheit herstellen, die Empfindlichkeiten des Auges auf die unterschiedlichen Wellenlängenreize ermitteln. Im Folgenden werden zwei Methoden dieser Abgleichversuche zur Ermittlung der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Auges beschrieben.

2.2.2 Maxwell-Methode

Maxwell ermittelte bereits 1860 die ersten 'color matching functions' mit Hilfe der, später nach ihm benannten, Abgleichmethode. Der Vorteil der Maxwell-Methode besteht darin, dass alle Abgleiche unter denselben Sehbedingungen stattfinden [WS00] (S.293). Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Versuchsaufbau des Maxwell-Farbabgleichs. Als Referenzfeld dient eine mit weißem Licht beleuchtete Fläche. Im Testfeld können drei Primärquellen dargeboten werden und ein monochromatischer Reiz. Ziel ist es, das Testfeld

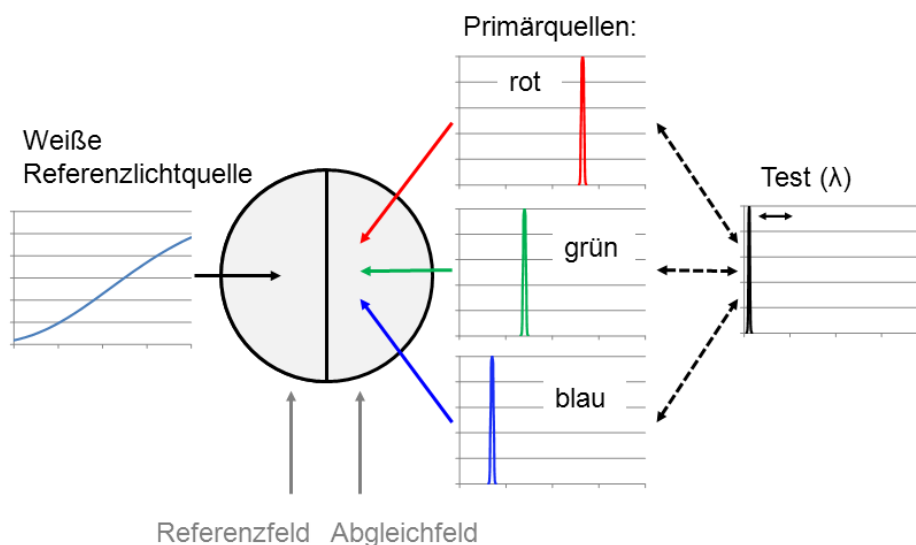


Abbildung 2.2 – Schematische Darstellung des trichromatischen Farbabgleichs nach Maxwell.

visuell dem weißen Referenzfeld anzupassen. Dabei ersetzt der monochromatische Reiz in der RGB-Mischung im Testfeld jeweils die Primärquelle, der er am ähnlichsten ist. Der monochromatische Reiz wird in seiner Wellenlänge in definierten Wellenlängenabständen einmal durch den sichtbaren Spektralbereich bewegt. Es ergeben sich wellenlängenabhängig die benötigten Anteile der Primärquellen um in einer Mischung mit dem monochromatischen Reiz denselben visuellen Reiz wie das weiße Referenzlichtfeld zu erzielen [Sto04].

2.2.3 Maximum-Saturation-Methode

Bei der Maximum-Saturation-Methode befindet sich auf einer Seite das Referenzfeld mit einem monochromatischen Reiz änderbarer Wellenlänge. Auf der anderen Seite wird eine Mischung aus RGB-Primärquellen dargeboten, mit der der monochromatische Reiz nachgebildet werden soll. Ist das nicht möglich, so kann dem monochromatischen Reiz in der Referenzhälfte eine der Primärquellen als entsättigende Komponente zugefügt werden. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.3 abgebildet. Am Ende ergeben sich sogenannte 'color matching functions'. Jeweils an der Stelle der Wellenlänge des monochromatischen Reizes wird der Anteil der drei Primärquellen an der Mischung im Testfeld aufgetragen. Wird eine Primärquelle auf der Seite des monochromatischen Reizes hinzugefügt, wird dies als negativer Anteil an der Mischung gewertet [Sto04]. Die Maximum-Saturation-Methode wurde von

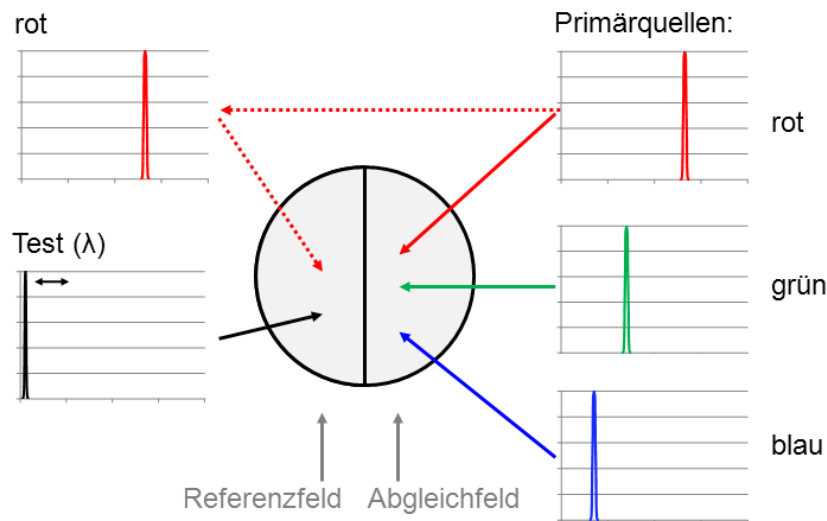


Abbildung 2.3 – Schematische Darstellung des trichromatischen Farbabgleichs mittels Maximum-Saturation-Methode.

Wright [Wri29] und Guild [Gui31] für ihre Farbabgleichversuche verwendet, die die Grundlage für die spätere Schaffung des CIE 2°-Standardbeobachters von 1931 lieferten. Auch die Untersuchungen von Stiles und Burch [Sti55] [SB59] zur Ermittlung des 10°-Standardbeobachters beruhten auf Maximum-Saturation-Abgleichen. Oicherman [OLRR09] fasst in seiner Veröffentlichung von 2009 zusammen, dass die 'color matching functions' von Beobachtern vor allem im Bereich kurzer Wellenlängen abhängig von der verwendeten Abgleichmethode unterschiedlich ausfallen. Daher stellt sich die Frage, ob die Maximum-Saturation-Methode die sinnvollste Methode ist, um Empfindlichkeitsfunktionen zu ermitteln, die im Bereich der Innenraumbeleuchtung zumeist für die Beschreibung ungesättigter Lichtfarben verwendet werden. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit mit Abgleichversuchen gearbeitet, bei denen die beiden zu vergleichenden Lichtquellen aus LEDs bestehen und die untersuchten Farbörter im Bereich des Planckschen Strahlers liegen.

2.2.4 Normspektralwertfunktionen CIE1931

1931 veröffentlichte die CIE in einem Standard den ersten Standardbeobachter für ein 2°-Beobachterfeld [CIE31] [SG32]. Die Vorarbeit zu diesem Standard lieferten die Arbeiten von Wright [Wri29] und Guild [Gui31]. Die Untersuchungen der beiden unabhängigen Forschergruppen führten unter Ver-

wendung von Primärlichtquellen deutlich unterschiedlicher Wellenlängen zu vergleichbaren Ergebnissen. Durch eine Transformation der verwendeten Primärquellen in die imaginären Primärquellen X, Y und Z konnte das Problem der negativen Funktionswerte beseitigt werden. Zudem wurde die Transformation in die X-, Y- und Z-Werte so entwickelt, dass die $\bar{y}(\lambda)$ -Funktion der Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ von 1924 entsprach [Wri07]. Nachdem diese Bedingungen erfüllt waren, konnten die Kurven von der CIE [CIE31] 1931 als internationaler Standard anerkannt werden. Abbildung 2.4 zeigt die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 für einen 2°-Standardbeobachter.

Bereits 1949 beschrieb Judd [Jud49] in einem Bericht über die Untersuchung der Farbwahrnehmung von Titan-Pigmenten, dass der 2°-Standardbeobachter der CIE die Blauempfindlichkeit im Bereich unter 430 nm zu wenig wichtet. 1955 stellt auch Stiles in seinen Untersuchungen zum CIE Standardbeobachter von 1931 erste Mängel fest. In seinen Untersuchungen zur Farbwahrnehmung im 2°-Beobachterfeld ergaben sich Unterschiede zwischen den von ihm ermittelten Spektralwertfunktionen und den von der CIE als Standard vorgeschriebenen Funktionen. Die größten Abweichungen lagen in der Blau- und Grünempfindlichkeit [Sti55]. Thornton [Tho98] beschrieb 1998, dass die Spektralwertfunktionen von 1931 bei metameren Spektren mit deutlich unterschiedlichen Spektren den Farbeindruck realer Beobachter nicht korrekt modellierten. Trotz gleicher Farbkoordinaten entsprechend der Spektralwertfunktionen CIE1931 nahmen die Beobachter die Testfläche als deutlich grünlicher wahr.

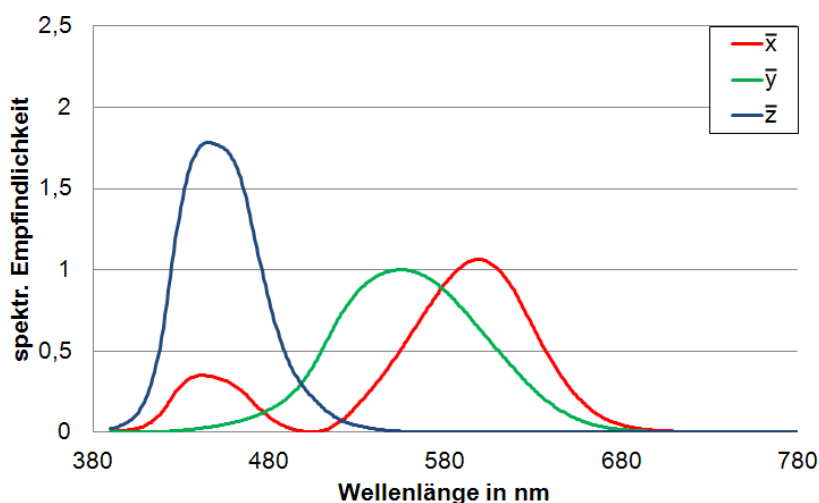


Abbildung 2.4 – Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 für einen 2°-Standardbeobachter.

2004 zeigten Borbely und Schanda [BS04] in ihren Untersuchungen, dass beim Abgleich von LED-Spektren auf Temperaturstrahler bei visueller Gleichheit der beiden Lichtquellen die Farbkoordinaten der Spektren unter Verwendung des CIE1931 Standardbeobachters deutliche Farbdifferenzen aufwiesen.

Trotz allem stellen die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 den Standard zur Farbbewertung dar. Daher arbeiten bis heute alle Farbmessinstrumente mit diesen Spektralwertfunktionen. In der vorliegenden Arbeit soll evaluiert werden, wie groß die Farbraumfehler sind, die unter Verwendung dieser Spektralwertfunktionen bei der Bewertung von LED-Spektren entstehen.

2.2.5 Normspektralwertfunktionen CIE1964

Schon kurze Zeit nach der Veröffentlichung des Standardbeobachters von 1931 wurden Untersuchungen dazu angestellt, unter welchen Bedingungen die Farbwahrnehmung durch die 1931er Spektralwertfunktionen unzureichend modelliert wurden. 1955 stellte Stiles [Sti55] am National Physical Laboratory in England neue Untersuchungen zur Ermittlung von 'color matching functions' sowohl in einem 2°- als auch in einem 10°-Beobachterfeld an. Er stellte fest, dass sich die gemittelten 10°-'color matching functions' im Vergleich zu den 2°-'color matching functions' im allgemeinen so verändern, wie man es bei einer Reduktion des Makulapigments erwarten würde [Sti55] (S.172). Nachdem er seine Arbeit zu den 10°-'color matching functions' fertiggestellt hatte, veröffentlicht Stiles [SB59] 1959 einen finalen korrigierten Satz Spektralwertfunktionen für einen 10°-Standardbeobachter. Das Technische Komitee W-1.3.1 empfahl 1959 unter Leitung von Judd [Jud59] einen Kompromiss zwischen den 'color matching functions' von Stiles und denen von Speranskaya für einen 10°-Standardbeobachter. Nach einer Transformation der Funktionen in ein X-,Y- und Z-System analog zu den Funktionen der CIE1931 wurden diese Spektralwertfunktionen 1964 von der CIE [CIE63] als 10°-Standardbeobachter anerkannt [Sch07] (S.35). Abbildung 2.5 zeigt die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 für einen 10°-Standardbeobachter.

Hilton Wright und Wyszecki [WW60] sowie Stiles und Wyszecki [SW62b] untersuchten die vom technischen Komitee W-1.3.1 vorgeschlagenen Spek-

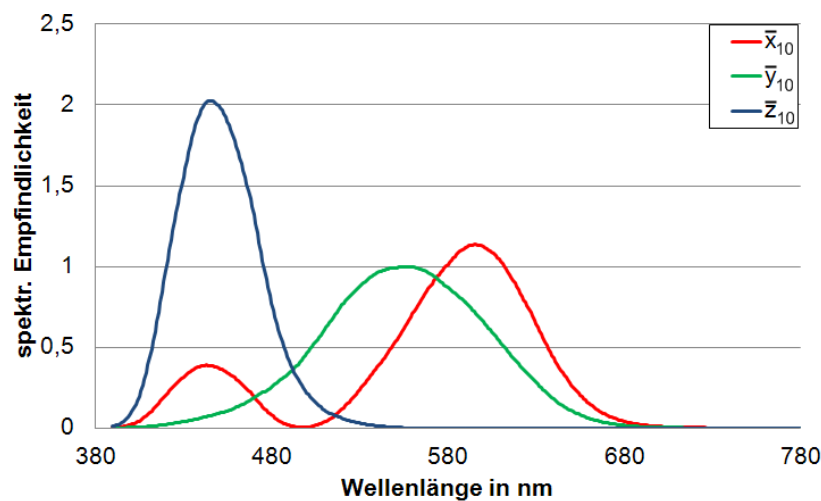


Abbildung 2.5 – Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 für einen 10°-Standardbeobachter.

tralwertfunktionen und kamen zu demselben Ergebnis. Beide Forschergruppen beschrieben Diskrepanzen zwischen den Farbabgleichen ihrer Probanden und den vom neuen 10°-Standardbeobachter vorausgesagten Koordinaten. Die deutlichsten Abweichungen ergaben sich dabei im bläulichen, bläulich-grünen und bläulich-weißen Bereich der Farbtafel. Crawford [Cra65] verglich 1965 in seinen Untersuchungen die Abgleichmethoden der Maximum-Saturation-Methode mit der Maxwell-Methode in einem 10°-Beobachterfeld. In seinen Untersuchungen führten beide Testmethoden zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Diesen Ergebnissen zufolge ist mit den Spektralwertfunktionen der CIE1964 keine sinnvolle Bestimmung visuell gleicher Spektren im Bereich ungesättigter Lichtfarben möglich. Oicherman [OLRR09] zeigte 2009 mit seinen Untersuchungen, dass die unter Laborbedingungen ermittelten Abweichungen zwischen visueller Wahrnehmung und Farbkoordinaten ermittelt mit den Spektralwertfunktionen CIE1964 auch in praktischen Anwendungen von Bedeutung sind. Bei Vergleichen zwischen Oberflächen- und Displayfarben stellten sich Diskrepanzen im weißen und bläulichen Bereich der Farbtafel dar.

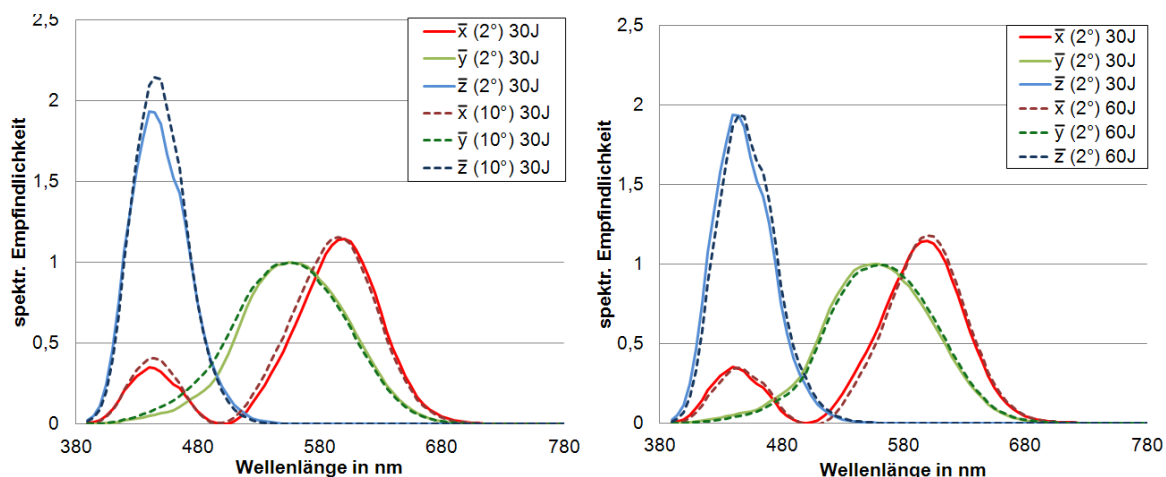


Abbildung 2.6 – Vergleich der Spektralwertfunktionen CIE2006 für einen 30-jährigen 2°-, bzw. 10°-Standardbeobachter (links) und für einen 30- bzw. 60-jährigen 2°-Standardbeobachter (rechts).

2.3 Entwicklung neuer Spektralwertfunktionen

2.3.1 Die Empfehlung CIE170-1:2006

Mit der CIE-Empfehlung CIE170-1:2006 [TC-06] wurde der Versuch unternommen, Spektralwertfunktionen zu entwickeln, welche die Vorgänge bei der Farbwahrnehmung im menschlichen Auge möglichst komplex abbilden. Die in der CIE-Empfehlung 170-1:2006 vorgeschlagenen spektralen Sehzapfen-Grundfunktionen beruhen einerseits auf den von Stiles und Burch [SB59] ermittelten 'color matching functions' für einen 10°-Standardbeobachter. Andererseits basieren sie auf Untersuchungen von Stockman und Sharpe [SSF99] [SS00] zu den Empfindlichkeiten der einzelnen Zapfentypen. Stockman und Sharpe versuchten, die spektralen Empfindlichkeiten einzelner Zapfentypen zu ermitteln, indem sie diese isolierten. Die meisten ihrer Untersuchungen fanden daher mit Mono- und Dichromaten statt. Die anderen Zapfenarten wurden dabei soweit überreizt, dass diese nicht weiter zur Diskriminierung eines Farbunterschieds beitragen konnten. Brainard beschreibt die von Stockman und Sharpe vorgeschlagenen Sehzapfen-Grundfunktionen als 'color matching functions', die sich ergeben würden, wenn bei den Abgleichversuchen Primärlichtquellen verwendet werden könnten, die jeweils nur einen der drei Zapfentypen stimulieren würden [BS09]. Die Sehzapfen-Grundfunktionen werden mit Hilfe der einzelnen Zapfenpigment-Absorptionsgrade, mit änderbarer Zapfenpigmentdichte je nach Beobachterfeldgröße, durch Filte-

rung des Makulapigments, mit änderbarem Absorptionsgrad je nach Beobachterfeldgröße, und durch Filterung mit dem Linsenpigment, mit änderbarem Absorptionsgrad je nach Alter der Beobachtergruppe, erstellt. In Abbildung 2.7 wird schematisch dargestellt, wie die Sehzapfen-Grundfunktionen ermittelt werden können. Mit Hilfe einer Transformationsmatrix lassen sich die Sehzapfen-Grundfunktionen dann wiederum in $\bar{x}(\lambda)$ -, $\bar{y}(\lambda)$ - und $\bar{z}(\lambda)$ -Kurven analog zu den bekannten Spektralwertfunktionen transformieren. Die Randbedingungen für die Ermittlung dieser Transformationsmatrix werden in Kapitel 2.3.2 genauer ausgeführt. Abbildung 2.6 zeigt die Spektralwertfunktionen basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen einmal für einen 30-jährigen Standardbeobachter unter einem 2°- bzw. 10°-Beobachterfeld und einmal unter einem 2°-Beobachterfeldwinkel für einen 30- bzw. 60-jährigen Standardbeobachter. Eine gute Zusammenfassung über die Entwicklung ihrer physiologisch wirksamen Sehzapfen-Grundfunktionen geben Stockman und Sharpe in der Präsentation ihrer Forschungsergebnisse auf dem ISS/CIE Experten Symposium '75 Years of the CIE Standard Colorimetric Observer' [SS06].

Bisher wurden die neuen Spektralwertfunktionen CIE2006 nur in wenigen Studien evaluiert. Eine der ersten Untersuchungen zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Spektralwertfunktionen, basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE von 2006, wurden von Bieske und Csuti [BCS07] 2007 durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die neuen Funktionen zwar eine verbesserte Anpassung der Farbwahrnehmung im blauen Bereich gegenüber den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 erreicht, aber immer noch Farbdifferenzen zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren bestehen bleiben. Csuti und Schanda [CS09] stellten 2009 bei Abgleichen zwischen Temperaturstrahlern bzw. Halogen-Metall dampflampen (teils mit farbigen Filtern versehen) und LED-Lichtquellen fest, dass die neuen Spektralwertfunktionen der Empfehlung der CIE von 2006 deutliche Verbesserungen gegenüber den Spektralwertfunktionen der CIE1931 lieferten. Trotzdem lagen die Farbdifferenzen zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° im Mittel bei $\Delta u'v' = 0,0151$ (zu $u'v'$ -Farbtafel siehe Kapitel 2.6). 2011 fanden weitere Untersuchungen von Csuti [CSP⁺11] zum Vergleich unterschiedlicher LED-Lichtquellen statt. Auch in diesen Untersuchungen konnten Dis-

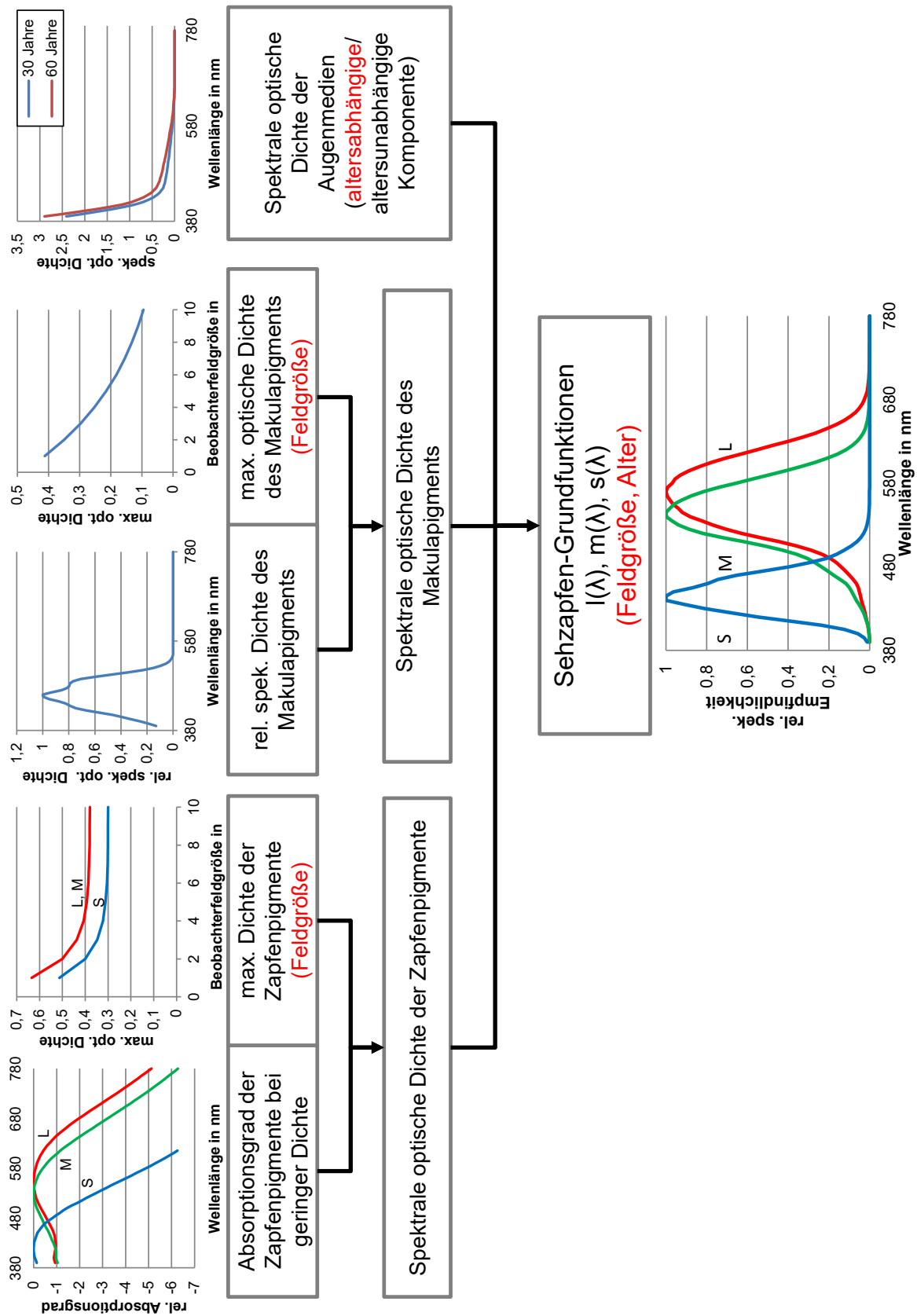


Abbildung 2.7 – Schematische Darstellung der Rechenschritte zur Ermittlung der Sehzapfen-Grundfunktionen entsprechend der CIE Empfehlung CIE170-1:2006.

krepanzen zwischen visueller Wahrnehmung und Farbkoordinaten festgestellt werden, die mit den Spektralwertfunktionen CIE2006 ermittelt werden. Sarkar [SAV⁺11] stellte 2011 in einer theoretischen Analyse der Spektralwertfunktionen CIE2006-10° mit den Datensätzen der Stiles und Burch-Untersuchungen fest, dass die Blauempfindlichkeit im Vergleich zu den Spektralwertfunktionen CIE1964 zwar deutlich besser modelliert wird, die Grün- und Rotempfindlichkeit dagegen aber keine Verbesserung erfahren. Dies wird darauf zurückgeführt, dass es drei Gruppen Normalsichtiger gibt, deren L- und M-Zapfenempfindlichkeiten verschobene Peakwellenlängen besitzen. Die Untersuchungen zur Evaluierung der Spektralwertfunktionen sind noch nicht abgeschlossen und werden auch in dieser Arbeit weiter fortgeführt.

2.3.2 Transformationsmatrizen

Wold und Valberg [WV99] [WV01] veröffentlichten 1999 und 2001 zwei Artikel über Methoden zur Ermittlung einer geeigneten Transformationsmatrix für die Transformation von Zapfenempfindlichkeitsfunktionen $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ in Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Diese bildeten die Grundlage, auf der die von Stockman [Sto13] verwendeten Transformationsmatrizen für die Ermittlung der Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{CIE2006-2^\circ}$, $\bar{y}_{CIE2006-2^\circ}$, $\bar{z}_{CIE2006-2^\circ}$ und $\bar{x}_{CIE2006-10^\circ}$, $\bar{y}_{CIE2006-10^\circ}$, $\bar{z}_{CIE2006-10^\circ}$ entstanden. Die Grundbedingungen für die Ermittlung der neuen Spektralwertfunktionen aus den Sehzapfen-Grundfunktionen lauten:

- Die neue $\bar{y}(\lambda)$ -Funktion muss der neuen $V(\lambda)$ -Funktion entsprechen. Da die von Sharpe und Stockman [SSJJ05] ermittelte und von Sharpe [SSJJ11] korrigierte Hellempfindlichkeitsfunktion eine Kombination aus L- und M-Zapfenempfindlichkeiten darstellt, ist dies einfach zu gewährleisten.
- Die $\bar{z}(\lambda)$ -Funktion entspricht in ihrer Form der S-Zapfenempfindlichkeit. Diese wird lediglich normiert, so dass die Fläche unter der $\bar{z}(\lambda)$ -Funktion der Fläche unter der $\bar{y}(\lambda)$ -Funktion entspricht.
- Die Bedingungen für die Ermittlung der Koeffizienten für die Transformation der \bar{x} -Funktion aus den L-, M- und S-Zapfenempfindlichkeiten basieren auf den Ausführungen von Wold [WV99] [WV01]:
 - Alle Funktionswerte $\bar{x}(\lambda)$ müssen positiv sein.

- Die Fläche unter der $\bar{x}(\lambda)$ -Funktion muss gleich der Fläche unter der $\bar{y}(\lambda)$ -Funktion sein.
- Die Koeffizienten der Transformation werden so gewählt, dass die euklidische Distanz zwischen den resultierenden Farbwertanteilen $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ und den CIE1931- bzw. CIE1964-Farbwertanteilen $x_{CIE1931/CIE1964}(\lambda)$, $y_{CIE1931/CIE1964}(\lambda)$, $z_{CIE1931/CIE1964}(\lambda)$ minimiert wird.

Diese Regeln sind allgemein für die Transformation von Sehzapfen-Grundfunktionen in Spektralwertfunktionen anwendbar. Sie gewährleisten eine Vergleichbarkeit der resultierenden Spektralwertfunktionen und Farbraumdarstellungen mit bestehenden Systemen. Gleichung 2.1 und 2.2 zeigen die Transformationsmatrizen, mit denen aus den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE von 2006 für das 2°-Beobachterfeld, bzw. das 10°-Beobachterfeld die Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{CIE2006-2^\circ}$, $\bar{y}_{CIE2006-2^\circ}$, $\bar{z}_{CIE2006-2^\circ}$ und $\bar{x}_{CIE2006-10^\circ}$, $\bar{y}_{CIE2006-10^\circ}$, $\bar{z}_{CIE2006-10^\circ}$ ermittelt werden können.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{CIE2006-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{y}_{CIE2006-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{z}_{CIE2006-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,94735469 & -1,41445123 & 0,36476327 \\ 0,68990272 & 0,34832189 & 0 \\ 0 & 0 & 1,93485343 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{l}_{CIE2006-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{m}_{CIE2006-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{s}_{CIE2006-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{CIE2006-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{y}_{CIE2006-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{z}_{CIE2006-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,93986443 & -1,34664359 & 0,43044935 \\ 0,69283932 & 0,34967567 & 0 \\ 0 & 0 & 2,14687945 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{l}_{CIE2006-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{m}_{CIE2006-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{s}_{CIE2006-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.3.3 Neueste Entwicklungen an der Universität von Pannonia

An der Universität von Pannonia in Ungarn beschäftigen sich Csuti und Schanda seit langem mit der Untersuchung bestehender Spektralwertfunktionen. In zwei Artikeln berichtet Csuti [CS09] [CSP⁺11], wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, über das Versagen der Spektralwertfunktionen der CIE-Empfeh-

lung CIE2006. Als Konsequenz aus diesen Untersuchungsergebnissen, versuchten Schanda und Csuti die Spektralwertfunktionen zu verbessern. Da aus ihren Untersuchungen hervor ging, dass die Funktionen vor allem im Bereich kurzer Wellenlängen zu Fehlanpassungen führten, versuchten sie durch Verschieben der S-Zapfen-Funktion, eine bessere Abbildung ihrer Untersuchungsergebnisse zu modellieren. Die von Csuti vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen basieren auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE von 2006 für ein 2°-Beobachterfeld mit einer um 6 nm hin zu niedrigeren Wellenlängen verschobenen S-Zapfen-Empfindlichkeit. Die Transformation in ein XYZ-Farbsystem erfolgt mit der in Gleichung 2.3 dargestellten Matrix. Die resultierenden Spektralwertfunktionen werden im Folgenden mit dem Zusatz 2006-UP-2° bezeichnet.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{2006-UP-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{y}_{2006-UP-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{z}_{2006-UP-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,9260000 & -1,3763289 & 0,3904850 \\ 0,6597958 & 0,4111496 & 0 \\ 0,0000822 & 0 & 1,9750000 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{l}_{2006-UP-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{m}_{2006-UP-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{s}_{2006-UP-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.4 Farbwahrnehmung und Beobachterfeldgröße

Alleine die Definition eines 10°-Standardbeobachters als Ergänzung zum 2°-Standardbeobachter macht deutlich, dass der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung von den Forschern schon in den sechziger Jahren als nicht vernachlässigbar angesehen wurde. Bereits 1955 ging Stiles [Sti55] davon aus, dass die von ihm ermittelten Unterschiede zwischen den Spektralwertfunktionen für einen 2°- und einen 10°-Standardbeobachter zum Großteil auf den Einfluss des Makulapigments zurückzuführen sind. 1976 stellte Pokorny [PSS76] [PS76] Untersuchungen dazu an, in welchem Zusammenhang die Änderung der Farbwahrnehmung, bedingt durch eine Beobachterfeldgrößenänderung, mit den unterschiedlichen am Sehprozess beteiligten Elementen steht. Dabei sprach er den größten Effekt der Abnahme der Photopigmentdichte bei größerer Distanz zur fovea centralis zu. In der CIE-Empfehlung CIE2006 [TC-06] werden bei einer Änderung der Beobachterfeld-

größe sowohl die Absorptionsdichte des Makulapigments als auch die Dichte des Zapfenpigment-Absorptionsgrades angepasst.

Kutas [KGBS05] beschäftigt sich mit Vergleichen zwischen Reizen unterschiedlicher Größe. Parry [PMM06] und Keefry [MMP07] untersuchen die Farbwahrnehmung bei Farbreizen kleiner physischer Ausdehnung, die nicht im zentralen Sehfeld abgebildet werden. Bei der vorgenommenen Literaturrecherche wurden jedoch keine Untersuchungen gefunden, welche sich mit der Farbabweichung beschäftigen, die sich zwischen zwei Spektren einstellt, wenn diese zuvor metamere Paare bildeten und dann lediglich unter einer anderen Beobachterfeldgröße betrachtet werden. Wyszecki beschäftigt sich als einziger bereits 1959 [Wys59] mit der theoretischen Erfassung des Einflusses der Beobachterfeldgröße auf vormals metamere Spektren. Er stellt dabei fest, dass Spektren, die in einem 2°-Beobachterfeld metamere Ensembles bilden in einem 10°-Beobachterfeld Farbdifferenzen von bis zu $\Delta xy = 0,0124$ ($\hat{=} \Delta u'v' = 0,0100$) aufweisen können. Da er zu dem gegebenen Zeitpunkt aber den Einfluss eines Wechsels zwischen einem 2°- und einem 10°-Beobachter als irrelevant betrachtet, folgen keine weiteren Untersuchungen zu diesen theoretischen Betrachtungen. Die farblich homogene Beleuchtung großer Flächen mit vielen kleinen Lichtquellen mit deutlich unterschiedlichen Spektren lässt diese Thematik erst heute wieder zu einem aktuellen Forschungsthema mit praktischer Relevanz werden. Der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung und die Abhängigkeit dieses Einflusses von den verwendeten Spektralverteilungen wird in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht.

2.5 Einflussfaktoren auf die Farbwahrnehmung außerhalb der Erfassung der Spektralwertfunktionen

Die Beschreibung des gesamten Farbeindrucks einer realen Situation ist selten so einfach zu erfassen, dass allein die Licht- oder Reflexionsspektren, die in das Auge einfallen, für den Farbeindruck verantwortlich sind. In der Regel beeinflusst die komplexe Umgebungssituation den wahrgenommenen Farbreiz. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der ersten Ebene der Farbwahrnehmung, in

der allein Lichtfarben bewertet werden, die ohne weitere Umgebungseffekte denselben Farbreiz auslösen sollen. Da aber in der Praxis jedes Spektrum in einer Umgebung dargeboten wird, sollen hier die wichtigsten Einflüsse auf die Farberscheinung eines Reizes kurz beschrieben werden.

Zunächst hängt die Farbwahrnehmung stark davon ab, welche Leuchtdichtenniveau die betrachtete Szene aufweist. Die Adaptationsbedingungen bestimmen wesentliche Sehfunktionen. Entsprechend des Leuchtdichtenniveaus kann von photopischen, mesopischen oder skotopischen Sehbedingungen ausgegangen werden. Im skotopischen Bereich ist Farbsehen unmöglich, da allein die Stäbchen auf einfallendes Licht reagieren. Im mesopischen Bereich ist die korrekte Erfassung der Farbwahrnehmung nahezu unmöglich, da gleichzeitig zu den Zapfen auch in unbestimmtem Maße noch Stäbchen aktiv sind und Einfluss auf die Farbwahrnehmung nehmen [WS00] (S.133). Die Beschreibung der Farbwahrnehmung mit Spektralwertfunktionen gilt für den photopischen Bereich, in dem allein die Zapfen als Photorezeptoren agieren.

Die chromatische Adaptation bezeichnet den Prozess, bei dem das Auge einen Weißabgleich durchführt und eine weiße Reflexionsfläche trotz unterschiedlicher Beleuchtungsfarben als unbunt bewertet. Dieser Effekt wird auch als Farbkonstanz bezeichnet, da der Mensch, unabhängig vom tatsächlichen Reflexionsspektrum, Objekten, vor allem menschlichen Hautfarben, immer dieselbe Farbe zuspricht [OR05] (S.188) [LL07](S. 265). Fairchild untersuchte 1995 die Zeit, die das menschliche Auge für die chromatische Adaptation benötigt [FR95]. Dabei stellte sich heraus, dass bei gleich bleibender Helligkeit 90% der chromatischen Adaptation nach 60 s abgeschlossen ist. Nach zwei Minuten kann von kompletter chromatischer Adaptation ausgegangen werden [FR95] [RG00]. Bei allen, in dieser Arbeit vorgestellten, Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass die Probanden mindestens zwei Minuten lang auf die Umgebungslichtfarbe adaptierten. Solange die Umgebungsbeleuchtung innerhalb einer Versuchsreihe immer beibehalten wird, kann davon ausgegangen werden, dass die chromatische Adaptation erhalten bleibt. Zudem ist der Einfluss der chromatischen Adaptation auf die Ergebnisse von Abgleichversuchen als gering einzuschätzen, da Farbgleichheit auf Zapfenebene ermittelt wird. Die nachfolgenden Prozesse der Farbsignalverarbeitung nehmen auf die wahrgenommene Farbgleichheit zwischen zwei Spektren keinen Einfluss.

Ein Farbreiz wird stark von seiner Umgebung beeinflusst. Simultankontraste beschreiben eine Art Gegenfarbüberhöhung. Wenn Gegenfarben nebeneinander abgebildet werden, erscheinen die beiden Farben deutlich gesättigter, als wenn jede Farbe jeweils in einem ungesättigten Umfeld dargestellt würde. Einen ähnlichen Effekt beschreiben induzierte Farben. So kann eine vollkommen achromatische Fläche durch das Hinzufügen eines stark gesättigten grünen Hintergrunds eine rötliche Farberscheinung hervorrufen. Während man diese Effekte früher als optische Täuschungen interpretierte, wird heute davon ausgegangen, dass diese Effekte wichtige Beiträge zur Objekterkennung, vor allem im Bereich der Wahrnehmungsschwellen, liefern [Val05] (S.261).

Viele weitere Effekte wie der Hunt-Effekt, Stevens-Effekt, Surround-Effekt etc. beschreiben zudem Zusammenhänge zwischen Helligkeitsniveau und Sättigung, Buntheit und wahrgenommenen Helligkeits- bzw. Buntheitsunterschieden [LL07] (S.271).

2.6 Die UCS- $u'v'$ -Farbtafel und Wahrnehmungsschwellen

Bis heute wird die UCS-Farbtafel von 1976 von der CIE [TC-04] für alle Anwendungen empfohlen, bei der eine gleichabständige Darstellung der Farbkordinaten von Lichtfarben in einem Farbraum erforderlich ist. Die Begründung für die Verwendung dieses Farbraums und keiner weiter entwickelten Farberscheinungsmodelle in der hier vorgestellten Arbeit ergibt sich aus der zunächst rein farbmetrischen Fragestellung. Da sich bei der Berechnung von Lichtfarben in Mischalgorithmen die Umgebungsbedingungen nicht vorher-sagen lassen, ist es definitionsbedingt nicht von Nutzen ein weiterentwickeltes Farberscheinungsmodell zu verwenden. In realen Anwendungssituationen lassen sich die Umgebungssituationen in der Regel auch nicht erfassen.

Die Entstehung der $u'v'$ -Farbtafel beruht auf den Untersuchungen von MacAdam zu kleinsten wahrnehmbaren Farbdifferenzen in der xy -Farbtafel. Nachdem sich bei seinen Untersuchungen herausstellte, dass die kleinsten wahrnehmbaren Farbdifferenzen deutlich ausgeprägte Ellipsen stark unterschiedlicher Größe um die untersuchten Farbbörter herum ergaben, wurde mit der Entwicklung der UCS- $u'v'$ -Farbtafel versucht diese Verzerrungen des Far-

braums zu verringern. MacAdam [Mac42] stellte 1942 Untersuchungen zur Beobachterunsicherheit bei Farbabgleichen an. Er ging davon aus, dass die gerade wahrnehmbare Farbdifferenz an einem Farbort direkt mit der Standardabweichung vieler Abgleiche an diesem Punkt zusammenhängt. In einem 2° -Beobachterfeld mit einer konstanten Leuchtdichte von 48 cd/m^2 führte ein Beobachter 25000 Farbabgleiche durch. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen stellen die bis heute weit verbreiteten MacAdam-Ellipsen dar. Obwohl MacAdam davon ausging, dass die dreifache Standardabweichung als gerade wahrnehmbare Farbdifferenz zu werten sei, wird in der Praxis in der Regel mit der einfachen Standardabweichung gerechnet. Im Bereich des Planckschen Strahlers zwischen 3500 K und 6500 K liegen die MacAdam-Ellipsenachsen in einem Wertebereich zwischen $b_{u'v'} = 0,0005..0,0008$ und $a_{u'v'} = 0,0018..0,0024$. 1949 folgten weitere Untersuchungen von Brown und MacAdam [BM49] zu Wahrnehmungsschwellen in einem 2° -Feld unter Verwendung eines schwarzen Hintergrunds. Brown [Bro57] untersuchte 1957 die Wahrnehmungsschwellen in einem 10° -Beobachterfeld mit weißer Hintergrundbeleuchtung mit Hilfe von 12 Beobachtern. Die resultierenden Brown-Ellipsen stellen Mittelungen der Standardabweichungs-Ellipsen aller

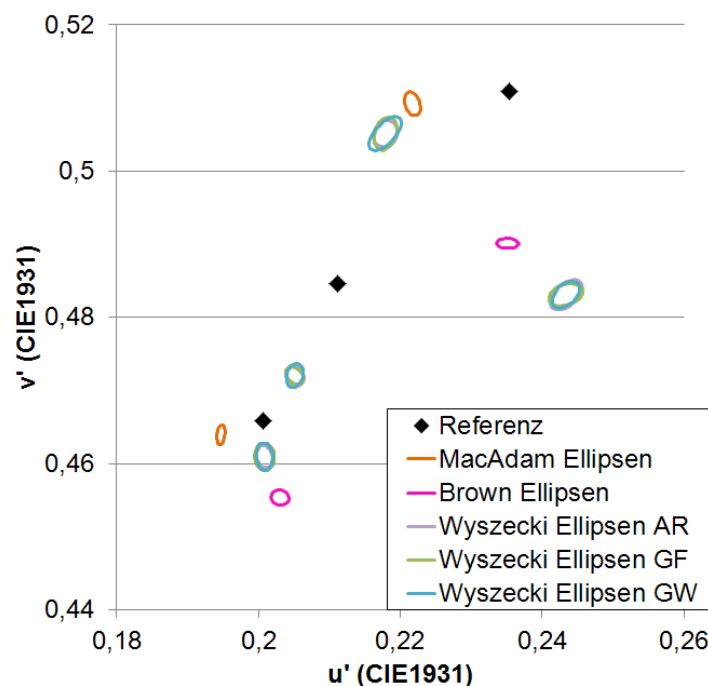


Abbildung 2.8 – Wahrnehmungsschwellen-Ellipsen im Bereich des Planckschen Strahlers von 3500 K bis 6500 K im UCS- $u'v'$ -Diagramm von 1976. Die MacAdam- und Brown-Ellipsen basieren auf Ermittlungen der Standardabweichung, während die Wyszecki-Felder-Ellipsen 95%-Ellipsen darstellen.

Beobachter dar. Im Bereich des Planckschen Strahlers zwischen 3500 K und 6500 K liegen die Werte der Ellipsenachsen zwischen $b_{u'v'} = 0,0008..0,0010$ und $a_{u'v'} = 0,0014$. In seinen Untersuchungen stellt Brown zudem fest, dass die Ellipsen sich bei einem Wechsel zwischen 2°- und 10°-Beobachterfeld lediglich in ihrer Größe, nicht aber in ihrer Orientierung oder Form ändern. Unter Verwendung eines größeren Beobachterfeldes wird die Ellipse kleiner. Das bedeutet die Wahrnehmungsschwelle sinkt und die Empfindlichkeit nimmt zu. Wyszecki und Fielder [WF71] stellten 1971 Untersuchungen zur Wahrnehmungsschwelle in einem 3°x6°-Feld vor weißem Hintergrund an. Drei Beobachter nahmen an den Untersuchungen teil. Im Bereich des Planckschen Strahlers zwischen 3500 K und 6500 K ergaben sich bei diesen Untersuchungen Wahrnehmungsschwellen-Ellipsen mit Achsenabschnitten zwischen $b_{u'v'} = 0,0010..0,0013$ und $a_{u'v'} = 0,0016..0,0040$. Abbildung 2.8 zeigt im Vergleich die Ellipsen aus den unterschiedlichen Untersuchungen im Bereich des Planckschen Strahlers von 3500 K bis 6500 K im UCS-u'v'-Diagramm von 1976. Dabei ist zu beachten, dass die MacAdam- und Brown-Ellipsen auf der einfachen Standardabweichung basieren, während die Wyszecki-Fielder-Ellipsen 95%-Daten-Ellipsen darstellen. Eine 95%-Daten-Ellipsen bedeutet, dass 95 Prozent aller Datenpunkte innerhalb der Ellipse liegen. Das würde in etwa einer doppelten Standardabweichung entsprechen. Demnach liegen die Ergebnisse aus den verschiedenen Untersuchungen in einem sehr ähnlichen Wertebereich. Im Mittel liegt die Wahrnehmungsschwelle im UCS-u'v'-Diagramm für den Bereich um den Planckschen Strahler von 3500 K bis 6500 K zwischen $\Delta u'v' = 0,0020$ und $\Delta u'v' = 0,0040$. Diese Werte werden in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe der Analyse von Intrabeobachterstreuungen überprüft.

2.7 Metamerie und Metamerie-Index

Metamerie beschreibt den Zustand, dass Lichtspektren oder Reflexionsspektren mit unterschiedlichen spektralen Strahldichten für einen bestimmten Normbeobachter dieselben Tristimuli-Werte besitzen [WS00] (S.184). Zur Zeit der Entstehung der Metamerie-Definition und deren Erforschung um 1960 wurde das Augenmerk ausschließlich auf die Bewertung der Metamerieeigenschaft von Objektfarben gerichtet, da zu diesem Zeitpunkt für die prak-

tisch angewandte Colorimetrie nur Objektfarben von Relevanz waren [WS00] (S.187). Zu dieser Zeit waren die spektralen Unterschiede der üblichen Lichtquellen gering.

Wyszecki [Wys59], Stiles [SW62a], Ohta [OW75b] [OW75a], Niemeroff [NY65] und weitere Forscher beschäftigten sich in der Zeit zwischen 1960 und 1990 mit der Analyse der unterschiedlichen Faktoren, die einen Einfluss auf den Grad der Metamerie eines metameren Paares haben. Außerdem versuchten sie Methoden zu entwickeln, um mit Hilfe von theoretischen Berechnungen große Sätze metamerer Spektren zu ermitteln, anhand derer sich das maximale Ausmaß des Metamerie-Einflusses, bei einem Wechsel des Beobachters bzw. der beleuchtenden Lichtquelle, ermitteln lässt. Verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Maßes der Metamerie zweier zu vergleichender Spektren wurden untersucht. Als Resultat dieser Untersuchungen setzte sich als Maß für die Metamerie-Eigenschaft zweier Spektren der Farbabstand ΔE^*_{ab} zwischen den beiden Spektren, bei einem gewechselten Beobachter oder einer gewechselten Beleuchtung, durch. Diese Farbdifferenz wird gleich dem Metamerie-Index gesetzt. Je nachdem welcher Einflussfaktor gewechselt wird (Beobachter oder Lichtquelle) nennt sich der Index 'spezieller Metamerie-Index für einen Wechsel des Beobachters' oder 'spezieller Metamerie-Index für einen Wechsel der Lichtquelle' [TC-04].

Da diese Arbeit sich auf die Betrachtung von Lichtfarben selbst konzentriert, ist der Metamerie-Index für einen Wechsel der Lichtquelle hier nicht von Belang. Der Metamerie-Index für einen Wechsel des Beobachters ist im eigentlichen Sinne so gedacht, dass abgeschätzt werden kann, wie stark sich die Schwankungen in der Farbwahrnehmung einzelner Personen um die Standardbeobachter herum auf die Wahrnehmung metamerer Spektren auswirken. Dieser Index wäre für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit relevant. Da aber keine verlässlichen Standardabweichungsbeobachter vorliegen kann mit diesem Index bis jetzt mit den neuen Spektralwertfunktionen nicht gerechnet werden. Bereits 1959 hatte Wyszecki [Wys59] die Idee diesen Index auf den Wechsel von einem 2°-Standardbeobachter auf einen 10°-Beobachter anzuwenden. Angelehnt an den Metamerie-Index für einen Wechsel der Beobachterfeldgröße wird in dieser Arbeit ein Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit entwickelt, der das Maß der Metamerie zweier zu vergleichender Spektren für einen bestimmten Farbort beschreibt.

3 Methodik und Versuchsaufbau

3.1 Untersuchungsmethoden

Ziel dieser Arbeit ist, es die Farbwahrnehmung bei LED-Spektren mit unterschiedlichen Spektralzusammensetzungen zu untersuchen. Es gilt herauszufinden, welche Bedingungen spektral unterschiedliche LED-Lichtquellen erfüllen müssen, um möglichst unabhängig von der Beobachterfeldgröße einen homogenen Farbeindruck zu liefern. Zwei grundlegende Eigenschaften der Farbwahrnehmung müssen dafür untersucht werden. Zum einen werden Spektralwertfunktionen benötigt, die für eine definierte Beobachterfeldgröße Spektren mit derselben visuellen Reizantwort im verwendeten Farbraum auf denselben Farbort abbilden. Zum anderen gilt es, den Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung zweier aneinander grenzender Spektren mit unterschiedlicher Spektralverteilung zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, die es erlauben unter definierten Umgebungsbedingungen einzelne Parameter gezielt zu verändern. Für die Untersuchung der Farbwahrnehmung metamerer Lichtfarben bei LED-Lichtquellen unterschiedlicher Spektralzusammensetzungen wurden quasi-symmetrische Abgleichtests [WS00] (S.282) in einem vertikal zweigeteilten Testfeld durchgeführt. Bei diesen Abgleichtests stellte der Proband zwischen zwei direkt aneinander grenzenden Testfeldern absolute Übereinstimmung in

Tabelle 3.1 – Zuordnung zwischen Skalenwert und Beschreibung des wahrgenommenen Farbabstandes; verwendet bei den Untersuchungen zur Farbdifferenzbewertung.

| Skalenwert | Beschreibung |
|------------|--------------------|
| 0 | nicht wahrnehmbar |
| 2 | gerade wahrnehmbar |
| 4 | klein |
| 6 | deutlich |
| 8 | sehr groß |

Farbton, Sättigung und Helligkeit her. Für die Untersuchung der wahrgenommenen Farbdifferenz zwischen zwei Testfeldern wurden subjektive Farbabstandsbewertungen durchgeführt. Bei diesen bewertete der Proband die Farbdifferenz zwischen zwei Lichtfarben auf einer psychometrischen Rangskala mit Werten von 0 bis 8. Die Zuordnung der visuellen Empfindung des wahrgenommenen Farbabstandes zu den Zahlen erfolgte entsprechend Tabelle 3.1.

3.2 Versuchsaufbau

Ein Laboraufbau wurde entwickelt, der es ermöglicht, sowohl die verwendeten Spektralzusammensetzungen, die Umgebungsbedingungen als auch die Beobachterfeldgröße der Testfläche zu kontrollieren. Der Versuchsaufbau besteht aus einer 1,80 m breiten, 2 m hohen und 1,60 m tiefen Abgleichkammer in der der Proband Platz nimmt. Alle Wände bis auf die Frontseite sind mit schwarzem Tuch ausgekleidet. Die Front der Abgleichkammer besteht aus einer Aluverbundplatte, die mit weißem Lack („Jana-white“ der Firma Mankiewicz) überzogen ist, wie er für die Lackierung der Wandelemente von Flugzeugkabinen verwendet wird. Mittig auf der Platte ist eine runde Scheibe befestigt, die auf der Welle eines Schrittmotors montiert ist. Damit lässt sich die Scheibe vom Computer angesteuert in definierten Schritten drehen. In der Scheibe sind kreisförmige Aussparungen in unterschiedlichen Größen enthalten. Für einen definierten Abstand des Beobachters zur Frontplatte von 80 cm

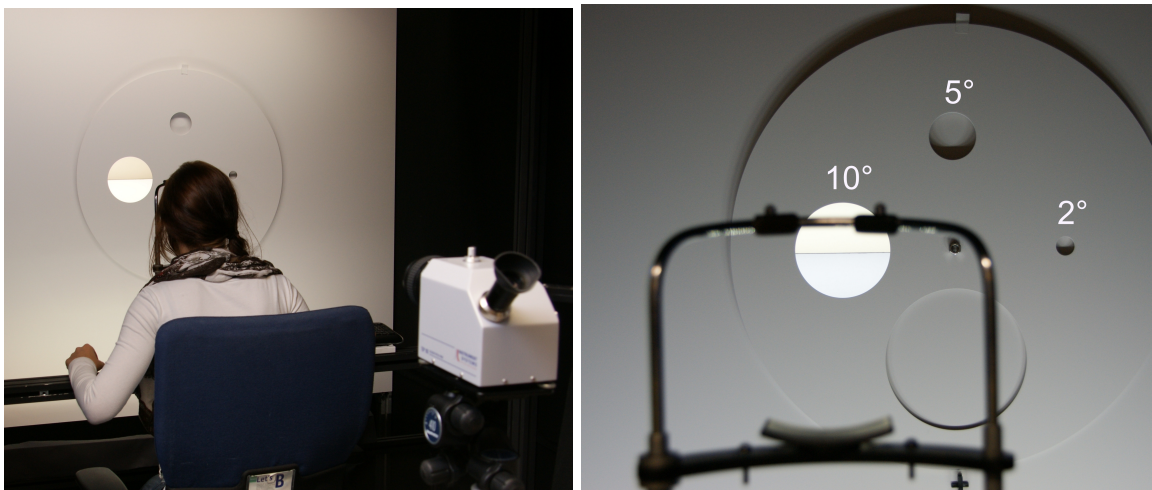


Abbildung 3.1 – Proband in Abgleichposition im Abgleichstand (links); Drehscheibe mit änderbaren Beobachterfeldausschnitten für die Abgleichuntersuchungen (rechts).

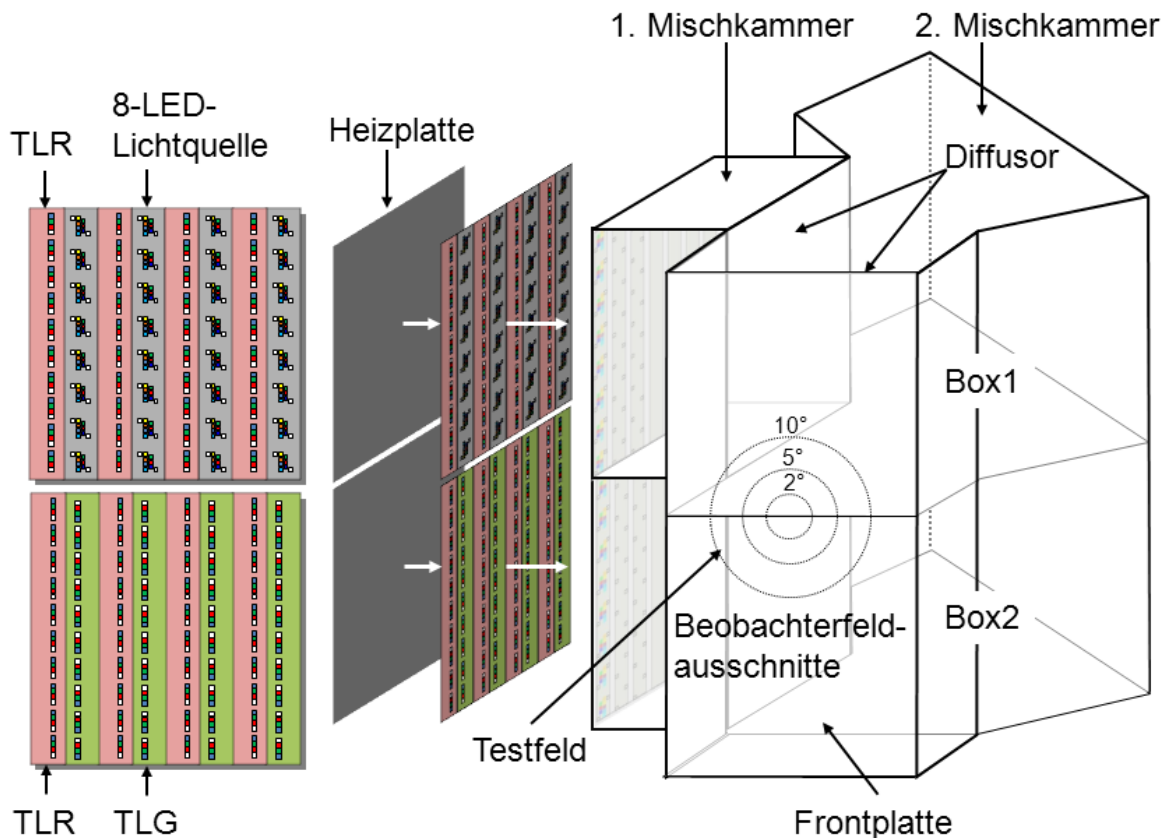


Abbildung 3.2 – Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus hinter den Testfeldern. Mischkammer 1 und Mischkammer 2 der beiden Lichtboxen mit jeweils zwei Diffusorschichten und den unterschiedlichen, auf Heizplatten montierten, Lichtquellen.

entsprechen die Ausschnitte in der Platte einem 2°-, 5°-, 10°-Beobachterfeld (vergleiche Abbildung 3.1 rechts). Damit kann der Versuchsleiter das Beobachterfeld, in dem der Proband den Abgleich vornimmt, anpassen ohne dass der Proband seine Position ändern muss. Abbildung 3.1 zeigt einen Probanden in Abgleichposition im Abgleichstand. Die Kopfhaltung des Probanden wird mittels einer Kinnstütze fixiert. Der Proband sieht die beiden Testfelder übereinander angeordnet. Beide Testfelder bestehen aus hinterleuchteten Diffusorplatten. Hinter der Diffusorplatte ist jeweils für Box1 und Box2 eine zweite Mischkammer angebracht, in die durch eine zweite Diffusorplatte hindurch das Licht der unterschiedlichen LED-Boards aus der ersten Mischkammer eingekoppelt wird. Die zweite Mischkammer ist so konstruiert, dass sich auf der Diffusorplatte die größtmögliche Homogenität hinsichtlich Farbort- und Leuchtdichte verteilt. Die Innenwände der Mischkammern sind mit Klebefolie des Typs Mesa-O der Firma Isovolta ausgelegt. Dieses hochreflektive und stark diffuse Material wird auch in der Flugzeugkabine als

Beschichtungsmaterial der Kabinenwände verwendet. Auf die genauere Spezifizierung der Oberflächen und der Diffusorfläche kann verzichtet werden, da die untersuchten Spektren direkt auf der diffusen, hinterleuchteten Beobachterfläche gemessen werden. Die beiden Testfelder sind durch eine dünne Metallplatte, mit derselben Beschichtung wie die Mischkammern, voneinander getrennt. Die 0,5 mm starke Trennplatte stellt sich für den Probanden als schmaler schwarzer Trennungsstrich dar. In Box2 sind jeweils 4 LED-Boards der Lichtquellen TLR und TLG angebracht. Eine genaue Beschreibung der Lichtquellen ist im folgenden Kapitel zu finden. In Box1 sind vier Boards der Lichtquelle TLR enthalten, um diese mit der Lichtquelle TLG vergleichen zu können. Zudem sind in Box1 vier Boards der 8-LED-Lichtquelle (vgl. Kapitel 3.3.3) installiert. Die LED-Boards sind mit Wärmeleitfolie auf einer 1 cm dicken Aluheizplatte befestigt und werden bei $(45 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ temperaturstabilisiert. Die ersten Mischkammern der beiden Boxen können ausgetauscht werden, so dass alle Lichtquellen entweder im oberen oder im unteren Testfeld dargeboten werden können. Die gesamte Frontplatte der Abgleichkammer kann von vorne mit LED-Lichtquellen beleuchtet werden, um die Umgebungsbedingungen für die Abgleichversuche vorzugeben. Die Lichtquellen sind so angebracht, dass sie die Fläche von oben und unten seitlich beleuchten. Um den Einfluss der Umgebungsbeleuchtung auf die Testfelder zu minimieren sind diese 7 cm hinter die Frontplatte versetzt. Der dadurch entstehende Freiraum ist mit schwarzem Schaumstoff ausgekleidet um kein Licht von außen auf die Abgleichfläche gelangen zu lassen. Direkt hinter der Abgleichposition des Probanden ist eine TOP100 Kamera, angeschlossen an ein Spektralradiometer CAS140-CT der Firma Instrument Systems (München), auf ein höhenverstellbares Stativ montiert. Mit dieser ist es möglich, sowohl die Referenz- als auch die Testfläche aus der Sicht des Probanden zu vermessen. Der Abstand der Referenzfläche der Kameraoptik zur Abgleichfläche beträgt 2180 mm. Alle Messungen wurden unter Verwendung der Blende 3 (Apertur 2 mm) vorgenommen. Alle in dieser Arbeit untersuchten Spektren wurden mit exakt diesem Messaufbau gemessen. Es wurde darauf geachtet, dass das Messsequipment während des gesamten Untersuchungszeitraums nicht bewegt wurde. Da bei den späteren Auswertungen immer relative Aussagen über die Farbdifferenzen zwischen zwei Spektren gemacht werden, die mit demselben Messsystem gemessen wurden, reicht es hier aus, die relative Messunsicher-

heit zu bestimmen. Für die Reproduziergenauigkeit innerhalb eines Messsystems liefert der Hersteller (Instrument Systems) für eine Kombination aus CAS140-CT und Ulbrichtkugel für die Farbkoordinaten x und y Angaben von $2 \cdot \sigma_{u'v'} = \pm 0,0001$. Für die Kombination aus CAS140CT und TOP100 Messkopf liefert der Hersteller keine Angaben. Aus den wiederholten Messungen der Referenzlichtquelle über den gesamten Untersuchungszeitraum konnte für die Reproduzierbarkeit der Kombination aus Unsicherheit des Messsystems und Instabilität der Referenzlichtquelle eine Streuung von $2 \cdot \sigma_{u'v'} \leq \pm 0,0008$ ermittelt werden. Die relative Messunsicherheit der gesamten Messstrecke kann also maximal Werte von $2 \cdot \sigma_{u'v'} = \pm 0,0008$ erreichen. Damit ist die relative Messunsicherheit im Verhältnis zu den in Kapitel 4.1.2.1 ermittelten Intrabeobachterstreuungen vernachlässigbar.

Die Mischkammer hinter der Diffusorfläche wurde so konstruiert, dass auf der Beobachterfläche möglichst große Homogenität herrscht. Die Leuchtdichteverteilung und Farbortabweichungen wurden unter Verwendung der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Lichtquelle TLG mit RGBW-Ansteuerung bei einer Farbtemperatur von 5000 K untersucht. Die Vermessung wurde mit dem, im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Messsystem aus einem CAS140-CT Spektrometer in Kombination mit einer TOP100 Messoptik durchgeführt. Um die Verteilung auf der Testfläche auch in der horizontalen Ausbreitung vermessen zu können, wurde das Stativ, auf dem die Messoptik befestigt war, mit gleich bleibendem Abstand zwischen Optik und Testfläche in 3,5 cm-Schritten verschoben. Damit ergaben sich für jede Testfläche acht Messpunkte. Der Farbort weicht innerhalb der größten genutzten Beobachterfläche des 10° -Beobachterfeldes maximal um $\Delta u'v' = 0,0004$ vom Mittelwert ab. Entsprechend den, in Kapitel 2.6 vorgestellten, Untersuchungen von MacAdam [Mac42], Brown [BM49] und Wyszecki und Fielder [WF71] zur Wahrnehmbarkeit von Farbunterschieden im UCS- $u'v'$ -1976-Farbraum liegt die Wahrnehmungsschwelle bei ca. $\Delta u'v' = 0,0020$. Damit sind die Lichtfarbenunterschiede auf der Bewertungsfläche vernachlässigbar. Die Leuchtdichte entlang der Trennlinie der beiden Kammern variiert zwischen maximalem und minimalem Leuchtdichtewert um drei Prozent. In vertikaler Ausrichtung variiert die Leuchtdichte um ca. 12 Prozent. In einer Studie von Schierz, Vandahl und Bieske [SVB08] (S.69) an der TU Ilmenau wurde festgestellt, dass bei kontinuierlich verlaufenden Leuchtdichtegradienten über einer Fläche Leuchtdichte-

unterschiede bis zu 20 Prozent unkritisch sind. Da die Leuchtdichteübergänge auf den Testflächen kontinuierlich sind und in beiden Bewertungsfeldern auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass die Flächen für die Probanden homogen ausgeleuchtet erscheinen. Dies wurde durch subjektive Aussagen der Probanden bestätigt.

3.3 Lichtquellen

Die Untersuchungen wurden konzipiert, um die Farbwahrnehmung bei LED-Lichtquellen mit unterschiedlichen Spektralzusammensetzungen zu untersuchen. Die meisten in der Praxis verwendeten LED-Beleuchtungssysteme enthalten entweder nur weiße LEDs oder Kombinationen aus RGB oder RGBW LEDs. Da die Untersuchungen darauf abzielen, Aussagen für den gesamten Farbraum treffen zu können, wurden für die Experimente nur solche Lichtquellen verwendet, bei denen der Farbort innerhalb der Gamut-Grenzen frei einstellbar ist. Die im Folgenden vorgestellten Lichtquellen können sowohl im RGB- als auch im RGBW-Modus betrieben werden. Bei den Versuchen wurde auf eine möglichst große Variation der verwendeten Spektraldifferenzen geachtet. Da die meisten bisherigen Untersuchungen von LED-Systemen auf Vergleichen zu Strahlern mit kontinuierlichen Spektralverteilungen basieren, z.B. bei Schanda und Borbely [BS04] und Bieske und Schanda [BCS07], soll auch in diese Untersuchung eine Referenzlichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum einbezogen werden. Diese besteht im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen aber aus einzelnen LED-Spektren. Der Output aller verwendeten LEDs kann mittels Pulsweitenmodulation (PWM) mit einer Taktfrequenz von 300 Hz gesteuert werden.

3.3.1 Lichtquellen TLR und TLG

Den Ausgangspunkt für die Untersuchungen bilden zwei weiße LED-Typen (T1 und T2). Dabei handelte es sich um weiße Rebel LEDs der Marke Lumileds aus benachbarten Ansi-Bins mit unterschiedlichen Spektralverteilungen. Abbildung 3.3 zeigt die Spektren der T1- und T2-LED im Vergleich. Werden diese beiden LED-Typen mit RGB-Komponenten kombiniert, ergeben sich bei Mischspektren mit exakt gleichem Farbort deutliche Unterschiede

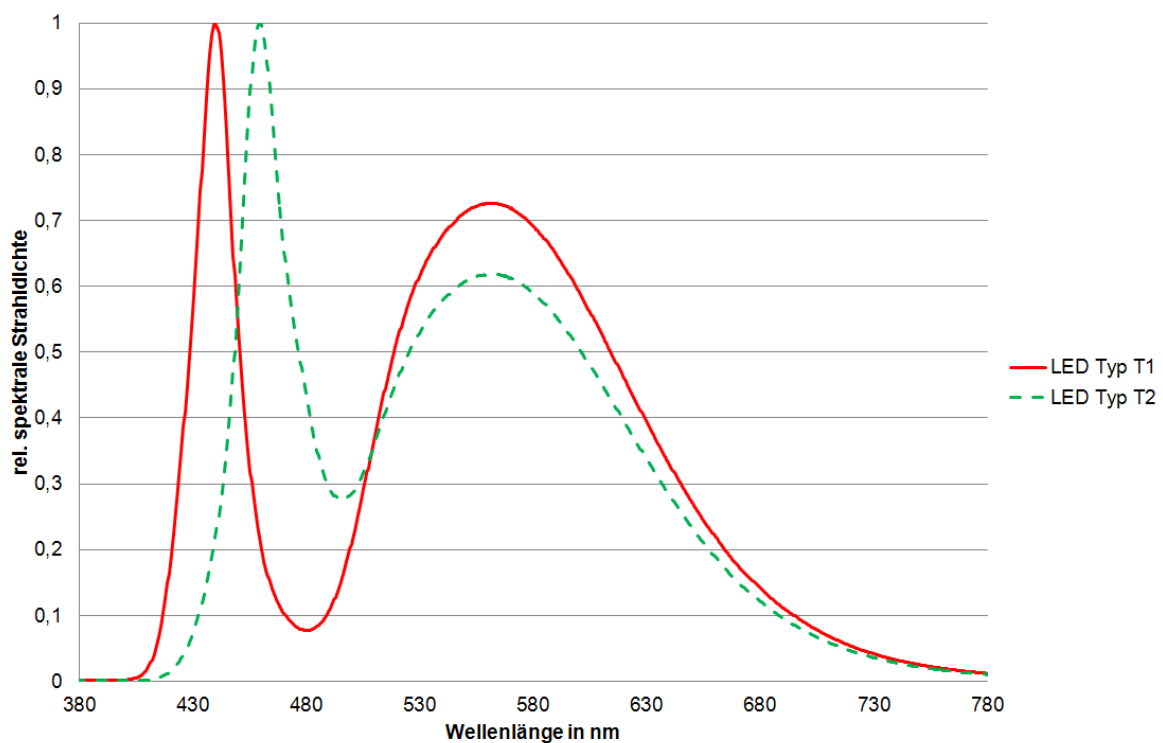


Abbildung 3.3 – Spektren der weißen LEDs der Typen T1 und T2. Hier zeigt sich deutlich, dass bei T1 durch die Verschiebung des Blaupеaks hin zu kürzeren Wellenlängen das Tal bei ca. 480 nm verstärkt wird.

in der visuellen Farbwahrnehmung. Da das Licht des LED-Typs T1 rötlich wahrgenommen wird, bezeichnet Testlichtquelle-Rot (TLR) im weiteren Verlauf die RGBW-Lichtquelle die diesen LED-Typ beinhaltet. Der LED-Typ T2 wirkt dagegen deutlich grünlich; daher wird die RGBW-Lichtquelle mit diesem LED-Typ im Folgenden als Testlichtquelle-Grün (TLG) bezeichnet. Der augenscheinlichste Unterschied zwischen den Spektren der beiden LED-Typen liegt in einer Verschiebung des Blaupеaks der weißen T1 LED hin zu geringeren Wellenlängen, was gleichzeitig eine Absenkung des Spektrums im Wellenlängenbereich zwischen 480 nm und 500 nm bedingt. Der Blaupеak der weißen T2 LED ist dagegen zu größeren Wellenlängen verschoben und damit mit einer Anhebung der Spektralanteile im Bereich zwischen 480 nm und 500 nm verbunden.

3.3.2 Umgebungsbeleuchtung

Die Umgebungsbeleuchtung besteht aus RGBW-LED-Boards, bestückt mit LEDs desselben Produkttyps wie TLR und TLG. Dabei wurden in diesem Fall alle Boards visuell selektiert, sodass ihre weißen LEDs einen weißen bis gelbliche Farbeindruck liefern. Die Peakwellenlängen der Blaupeaks der weißen LEDs liegen genau zwischen denen der Blaupeaks der LEDs des Typs T1 und T2. Die Umgebungslichtquelle wird immer im RGBW-Modus angesteuert und der Farbart wird der untersuchten Lichtfarbe angepasst.

3.3.3 8-LED-Lichtquelle

Um neben den Standard-LED-Lichtquellen in RGB- und RGBW-Kombinationen auch über eine Lichtquelle zu verfügen, die für die Vergleichbarkeit der Lichtquellen auf LEDs basiert und dabei ein möglichst kontinuierliches Spektrum aufweist, wurde eine 8-LED-Vollspektrum-Lichtquelle entwickelt. Bei acht einzelnen Lichtquellen gibt es unendlich viele Möglichkeiten eine Mischung zu ermitteln, die den gewünschten Farbart besitzt. Daher wurden vor den Untersuchungen für die zu untersuchenden Farbörter Mischungen ermittelt, die möglichst wenige Spitzen und Täler enthalten. Zudem bietet sich mit dieser Lichtquelle die Möglichkeit, alle beliebigen Kombinationen der enthaltenen LEDs als neue Lichtquellen zu definieren. Außerdem lassen sich alle einzelnen LEDs der 8-LED-Lichtquelle mit den LEDs der Lichtquelle TLR kombinieren und als neue Lichtquelle nutzen. Die Spektren der einzelnen verwendeten LEDs der 8-LED-Vollspektrum-Lichtquelle sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Tabelle 3.2 enthält eine Liste der verwendeten LEDs mit Angaben

Tabelle 3.2 – Zusammenstellung aller LEDs, die in der 8-LED-Vollspektrum-Lichtquelle verwendet werden, einschließlich Bestromungsangaben und Peakwellenlängen.

| Bez. | Typ | Hersteller | Farbe | $I_{\text{Nutz}}/\text{mA}$ | $\lambda_{\text{Peak}}/\text{nm}$ |
|------|-----------------------|------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|
| CW | Power Topled | Osram OS | Warm Weiß | 50 | - |
| CB | Power Topled | Osram OS | Hellblau | 30 | 461 |
| G | Advanced Power Topled | Osram OS | Grün | 50 | 527 |
| B | Advanced Power Topled | Osram OS | Blau | 50 | 467 |
| CY | Advanced Power Topled | Osram OS | Gelb | 100 | 606 |
| R | Power Topled | Osram OS | Rot | 50 | 645 |
| C | Rebel | Lumileds | Cyan | 100 | 497 |
| A | Rebel | Lumileds | Amber | 100 | 596 |

zu deren Bestromung im Versuchsaufbau. Die in den Versuchen verwendeten Mischspektren der 8-LED-Lichtquelle sind in Kapitel 3.4 dargestellt.

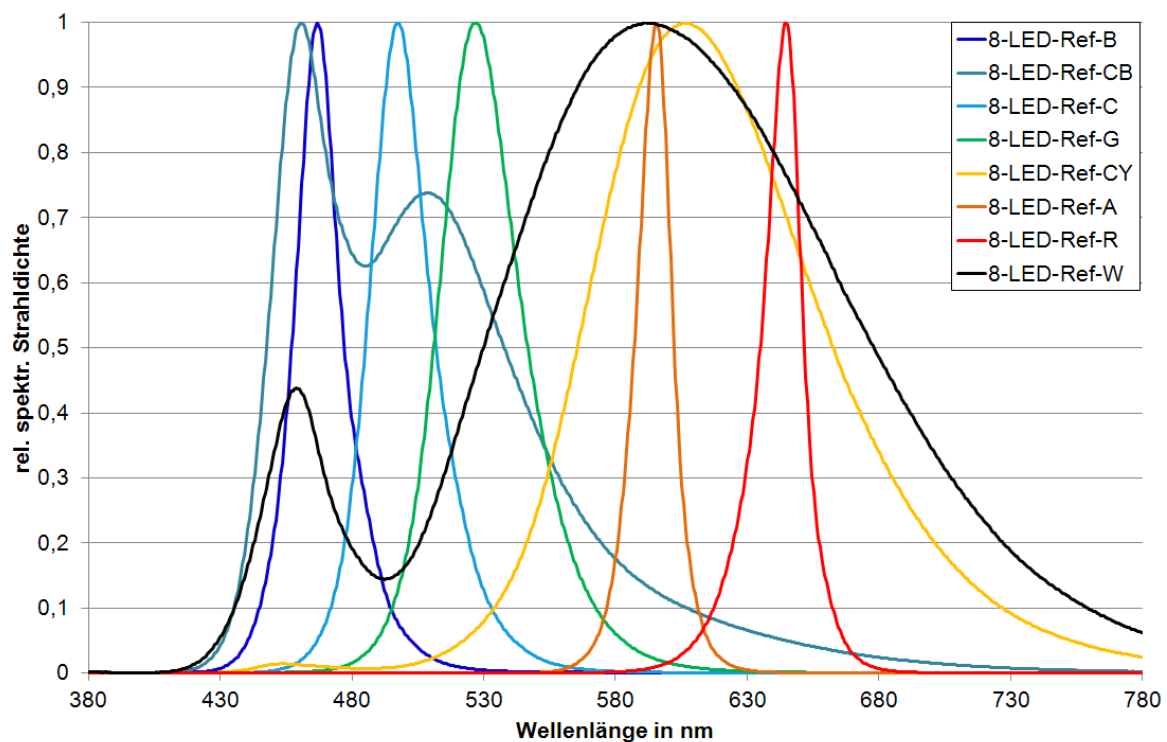


Abbildung 3.4 – Spektren der einzelnen LEDs der 8-LED-Lichtquelle.

3.3.4 Ansteuerung der Testlichtquelle durch den Probanden

Da mit den durchgeführten Versuchen zunächst der UCS- u^*v^* -Farbraum der CIE von 1976, basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1931, untersucht werden soll, wird auch die Ansteuerung der Testlichtquelle in diesem Farbraum realisiert. Der Proband bewegt sich in einem vereinfachten vier-Farb-System basierend auf dem Gegenfarbmodell nach Hering [Her20] (S.48). Er kann sich bei der Ansteuerung der Testlichtquelle auf zwei Achsen, einer Rot-Grün-Achse und einer Blau-Gelb-Achse, bewegen. Als Endpunkte dieser Achsen dienen, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, die Farbörter der roten, grünen und blauen LED der Lichtquelle. Die Blau-Gelb-Achse wird so angelegt, dass sie orthogonal zur Achse Rot-Grün liegt. Als gelber Achseneckpunkt dient ein Farbort auf der Achse zwischen grüner und roter LED.

Tabelle 3.3 – Ansteuerung der Testlichtquelle über die Pfeiltasten.

| Taste | Farbe | $\Delta u'_{CIE1931}$ | $\Delta v'_{CIE1931}$ |
|--------------|-------|-----------------------|-----------------------|
| Pfeil links | Grün | - 0,000495 | + 0,000068 |
| Pfeil rechts | Rot | + 0,000495 | - 0,000068 |
| Pfeil oben | Gelb | + 0,000068 | + 0,000495 |
| Pfeil unten | Blau | - 0,000068 | - 0,000495 |

Die Schrittweite bei einem Tastendruck wurde auf $\Delta u'v' = 0,0005$ festgelegt. Die resultierenden $u'v'$ -Änderungen bei Ansteuerung einer Taste des Pfeiltastenfeldes kann aus Tabelle 3.3 abgelesen werden. Jeder einzelne Farbkanal der PWM-Ansteuerung hat eine Auflösung von 16 Bit. Der Proband steuert die gewünschte Farbänderung in die entsprechende Farbrichtung über die Pfeiltasten auf einer Tastatur selbst. Die Pfeiltasten sind so belegt, dass der Pfeil nach links den Farbot der Testlichtquelle ins grünliche verschiebt, nach rechts ins rötliche, nach oben ins gelbliche und nach unten ins bläuliche. Die Testperson kann außerdem die Helligkeit der Testlichtquelle anpassen. Die Ansteuerung erfolgt über die 'page up' und 'page down' Tasten der Tastatur und regelt die Leuchtdichte in ein Prozent-Schritten.

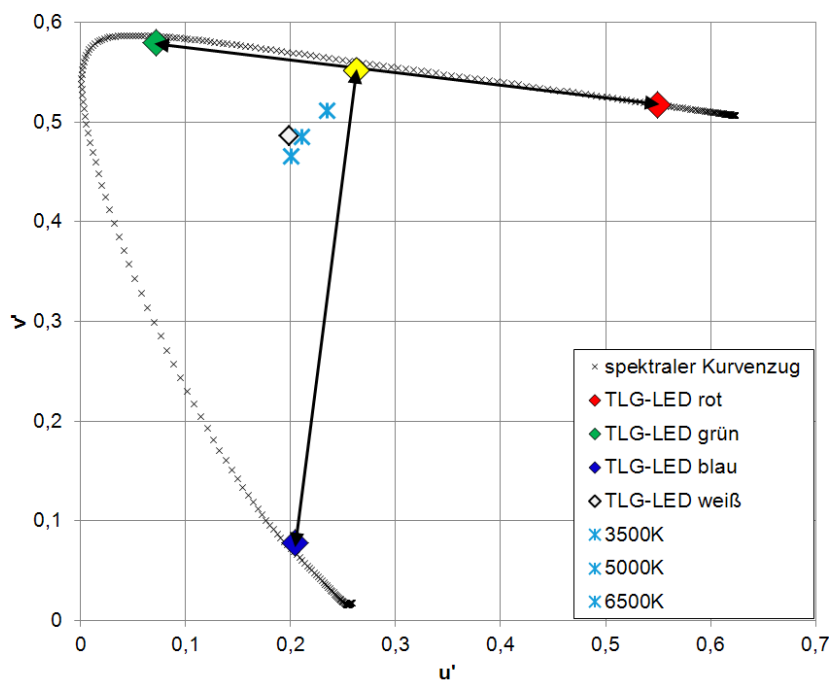


Abbildung 3.5 – UCS- $u'v'$ -Diagramm von 1976 mit eingezeichneten Rot-Grün- und Gelb-Blau-Achsen zur Ansteuerung der Testlichtquelle. Die Farbwörter der untersuchten Mischfarben bei 3500 K, 5000 K und 6500 K sind jeweils mit einem Stern gekennzeichnet.

3.3.5 Farbmischalgorithmus

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, steuert der Proband die Testlichtquelle an, indem er $u'v'$ -Koordinaten kommandiert. Um aus diesen Koordinaten Steuersignale für die PWM-Ansteuerung der LED-Boards zu gewinnen, wird ein Farbmischalgorithmus verwendet. Die einzustellende Leuchtdichte ist durch die Leuchtdichte des Referenzfeldes vorgegeben. Der Farbmischalgorithmus lässt sich sowohl für die Ansteuerung einer RGB-Lichtquelle als auch für die Ansteuerung einer RGBW-Lichtquelle verwenden. Im Folgenden wird der Algorithmus anhand einer RGB-Lichtquelle erläutert. Für die Verwendung einer LED-Lichtquelle im RGBW-Modus wird der Algorithmus einmal für die Mischung der weißen LED mit zwei farbigen Komponenten und einmal für die RGB-Komponenten durchgeführt. Die beiden Ergebnisse werden dann addiert und die neue Mischung entsprechend der gewünschten Helligkeit skaliert.

Als Eingangsparameter werden die $u'v'$ -Koordinaten und die Leuchtdichte der einzelnen RGB-Komponenten benötigt. Diese werden mit u'_R, v'_R, L_{Rmax} , u'_G, v'_G, L_{Gmax} und u'_B, v'_B, L_{Bmax} bezeichnet. Die vom Probanden angesteuerte $u'v'$ -Koordinate liefert den 'Point of Interest' (u'_{POI}, v'_{POI}) mit der einzustellenden Leuchtdichte L_{POI} . Im Normvalenzsystem lassen sich die einzelnen Farbvalenzen der roten, grünen und blauen LED mit den Normfarbwerten (X_i, Y_i, Z_i) wie folgt darstellen [Wri46] (S.78 ff.):

$$\begin{aligned}\vec{F}_R &= X_R * \vec{X} + Y_R * \vec{Y} + Z_R * \vec{Z} \\ \vec{F}_G &= X_G * \vec{X} + Y_G * \vec{Y} + Z_G * \vec{Z} \\ \vec{F}_B &= X_B * \vec{X} + Y_B * \vec{Y} + Z_B * \vec{Z}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Die Theorie der Farbmischung besagt, dass sich eine Farbvalenz aus mehreren Farbvalenzen nach folgender Formel mischen lässt:

$$\vec{F}_{POI} = \vec{F}_R + \vec{F}_G + \vec{F}_B = X_{POI} * \vec{X} + Y_{POI} * \vec{Y} + Z_{POI} * \vec{Z}\tag{3.2}$$

Wobei sich X_{POI} wie folgt berechnet und Y_{POI}, Z_{POI} analog berechnet werden:

$$X_{POI} = X_R + X_G + X_B\tag{3.3}$$

Die Normfarbwerte der einzelnen LEDs sowie des angesteuerten 'Point of Interest' lassen sich über die $u'v'$ -Werte in Kombination mit der Leuchtdichte ($L=Y$) darstellen:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{y} * L = \frac{9u'}{4v'} * L \\ Y &= L \\ Z &= \frac{1-x-y}{y} * L = \frac{-3u' - 20v' + 12}{4v'} * L \end{aligned} \quad (3.4)$$

Mit den Gleichungen 3.3 und 3.4 lässt sich die Farbvalenz des 'Point of Interest' mit der Matrix M aus den Leuchtdichtewerten der RGB-LEDs berechnen:

$$\begin{bmatrix} X_{POI} \\ Y_{POI} \\ Z_{POI} \end{bmatrix} = M * \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \text{ mit } M = \begin{bmatrix} \frac{9u'_R}{4v'_R} & \frac{9u'_G}{4v'_G} & \frac{9u'_B}{4v'_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{-3u'_R - 20v'_R + 12}{4v'_R} & \frac{-3u'_G - 20v'_G + 12}{4v'_G} & \frac{-3u'_B - 20v'_B + 12}{4v'_B} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Mit der inversen Matrix M^{-1} lassen sich die benötigten Leuchtdichten der einzelnen LEDs für die Mischung des gesuchten POI als Funktion der Normfarbwerte des 'Point of Interest' und der $u'v'$ -Farbkoordinaten der LED-Spektren ermitteln:

$$\begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} = M^{-1} * \begin{bmatrix} X_{POI} \\ Y_{POI} \\ Z_{POI} \end{bmatrix} = M^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{9u'_{POI}}{4v'_{POI}} * L_{POI} \\ L_{POI} \\ \frac{-3u'_{POI} - 20v'_{POI} + 12}{4v'_{POI}} * L_{POI} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Aus dem Verhältnis der Soll-Ansteuerung der Farbwerte X, Y, Z der Einzel-LEDs und deren bekannter maximaler Leuchtdichte lassen sich die prozentualen Ansteuerwerte ermitteln.

$$Prozent_R = \frac{Y_R}{L_{Rmax}}; \text{ Prozent}_G = \frac{Y_G}{L_{Gmax}}; \text{ Prozent}_B = \frac{Y_B}{L_{Bmax}} \quad (3.7)$$

Tabelle 3.4 – Zusammenstellung der in den Versuchsszenarien VS1 bis VS9 verwendeten Referenz- und Testlichtquellen.

| Versuchsszenario | Referenzlichtquelle | Testlichtquelle |
|------------------|---------------------|-----------------|
| VS1 | TLR-RGBW | TLG-RGBW |
| VS2 | TLR-RGB | TLG-RGB |
| VS3 | TLR-RGBW+C | TLG-RGBW |
| VS4 | 8-LED-Vollspektrum | TLR-RGBW |
| VS5 | 8-LED-Vollspektrum | TLG-RGBW |
| VS6 | 8-LED-Vollspektrum | TLR-RGB |
| VS7 | ACB-Mix | TLR-RGB |
| VS8 | TLR-Cyan-Mix-RGBW | TLG-RGBW |
| VS9 | RCBW-Mix | TLR-RGBW |

Tabelle 3.5 – Zusammensetzung der verwendeten Referenz- und Testlichtquellen.

| Bezeichnung | Erläuterung |
|--------------------|---|
| TLR | Mischung aus LED Typ T1 und roter, grüner und blauer LED |
| TLG | Mischung aus LED Typ T2 und roter, grüner und blauer LED |
| TLR-RGBW+C | RGBW-Mischung der TLR mit konstantem Mischanteil einer cyanfarbenen LED |
| 8-LED-Vollspektrum | Mischspektrum ohne Lücken (vgl. Kapitel 3.3.3) |
| ACB-Mix | Mischung aus amber-, cyanfarbener und blauer LED |
| TLR-Cyan-Mix-RGBW | Mischung aus LED Typ T1 und roter, cyanfarbener und blauer LED |
| RCBW-Mix | Mischung aus roter, cyanfarbener, blauer und warmweißer LED der 8-LED-Lichtquelle |

3.4 Versuchsszenarien

Mit den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Lichtquellen können viele unterschiedliche Kombinationen von LED-Mischungen generiert werden. In diesem Kapitel werden alle Versuchsszenarien definiert, die im Folgenden zum Einsatz kommen und eine bestimmte LED-Kombination der vorgestellten Lichtquellen als Referenz- und als Testlichtquelle verwenden. In Tabelle 3.4 sind die in den einzelnen Versuchsszenarien eingesetzten Referenz- oder Testlichtquellen zusammengestellt. Die verwendeten Abkürzungen werden in Tabelle 3.5 erläutert. Zudem werden in Tabelle 3.6 die Peak-Wellenlängen der einzelnen RGBW-Anteile aufgeführt.

- Versuchsszenario VS1 beschreibt den Vergleich der beiden LED Typen T1 und T2 in Kombination mit RGB-LEDs. Aufgrund der Hypothese, dass die Diskrepanz zwischen visuellem Eindruck und messtechnischer Metamerie zwischen TLR und TLG auf den spektralen Unterschieden im Bereich zwischen 480 nm und 500 nm beruht, wurde für Versuchsszena-

rio VS3 das RGBW-Mischspektrum der TLR mit der Spektralverteilung einer Cyan-LED aufgefüllt.

- Versuchsszenario VS2 beschreibt den Vergleich der RGB-Spektren von TLR und TLG. Die Spektralverteilungen der roten und blauen LED sind nahezu gleich. Auffällig ist die Verschiebung des Peaks der grünen LED der TLR um 10 nm hin zu größeren Wellenlängen.
- In Versuchsszenario VS4 und VS5 werden TLR bzw. TLG als Testspektrum auf eine 8-LED-Vollspektrum-Referenzlichtquelle (siehe Kapitel 3.3.3) abgeglichen.
- Versuchsszenario VS6 und VS7 wurden eingeführt, um mit maximal verschiedenen Spektralzusammensetzung von Test- und Referenzspektrum Worst-Case Szenarien in die Versuche mit einzubeziehen. Diese sind in der Realität unwahrscheinlich anzutreffen, sollen aber eine Abschätzung ermöglichen, welche Fehler im schlimmsten Fall auftreten können. Dies basiert auf der Annahme, dass der Fehler umso größer wird, je unterschiedlicher die verglichenen Spektralverteilungen sind. In VS6 wird ein möglichst lückenloses Spektrum (8-LED-Vollspektrum-Referenzlichtquelle) mit einem reinen Peakspektrum (RGB-Mischung von TLR) verglichen. Versuchsszenario VS7 stellt ein Worst-Case-Szenario dar, in dem zwei Peakspektren miteinander verglichen werden, wobei die Peaks der Spektren genau versetzt liegen. Abbildung 3.6 zeigt die Spektralverteilungen der Amber-Cyan-Blau-Mischung (im Folgenden ACB-Mix) und der dazugehörigen RGB-Mischung.
- Versuchsszenario VS8 und VS9 vergleichen unterschiedliche RGBW-Kombinationen. VS8 verwendet als Referenzlichtquelle TLR, wobei die grüne LED durch die Cyan LED der 8-LED-Lichtquelle ersetzt wird. Als

Tabelle 3.6 – Peakwellenlängen λ_{Peak} und Halbwertsbreiten λ_{FWHM} der einzelnen LED-Komponenten.

| Bezeichnung | rote LED | | grüne LED | | blaue LED | | Blaukomponente der weißen LED | |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | λ_{Peak} /nm | λ_{FWHM} /nm | λ_{Peak} /nm | λ_{FWHM} /nm | λ_{Peak} /nm | λ_{FWHM} /nm | λ_{Peak} /nm | λ_{FWHM} /nm |
| TLR | 643 | 18 | 535 | 36 | 449 | 23 | 440 | 22 |
| TLG | 640 | 17 | 525 | 32 | 447 | 18 | 460 | 28 |
| ACB-Mix | 596 | 15 | 497 | 27 | 467 | 20 | - | - |

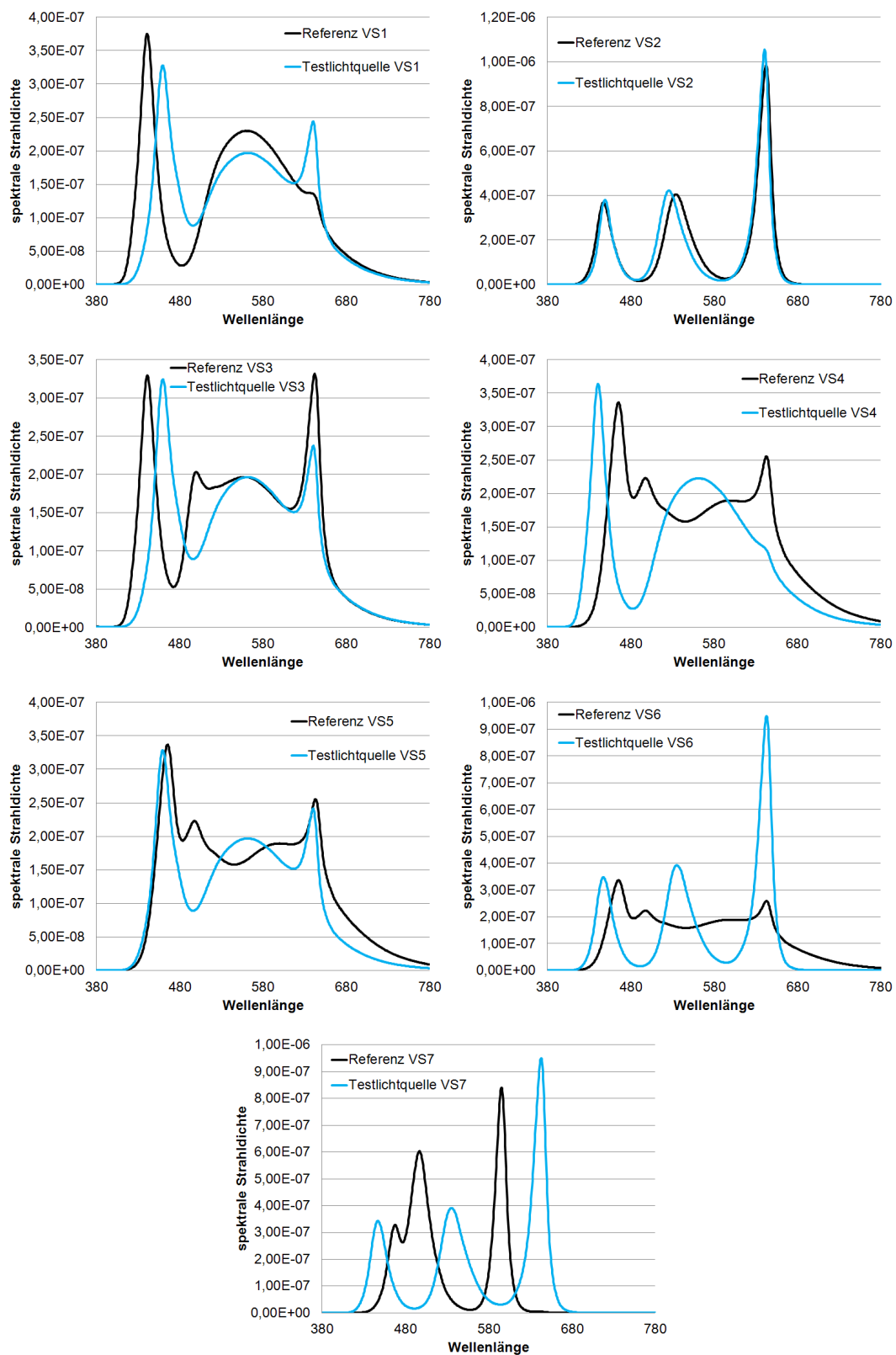


Abbildung 3.6 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 zu Beginn der Abgleichversuche bei 5000 K, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

Testlichtquelle dient TLG in der RGBW-Mischung. Für VS9 bilden die rote, cyanfarbene, blaue und weiße LED der 8-LED-Referenzlichtquelle ein RGBW-System und werden mit TLR-RGBW als Testlichtquelle verglichen.

In Abbildung 3.6 sind die Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 zu Beginn der Abgleichversuche bei 5000 K, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931, dargestellt. Analog dazu finden sich die Spektren für die Abgleichversuche bei 3500 K und 6500 K im Anhang A.1. Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch die Spektren der Referenz- und Testlichtquelle für Versuchsszenario VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF3. Die Spektren für die Testlichtfarben TF1, TF2, TF4 und TF5 sind im Anhang A.1 zu finden. Die untersuchten Lichtfarben werden im folgenden Kapitel beschrieben.

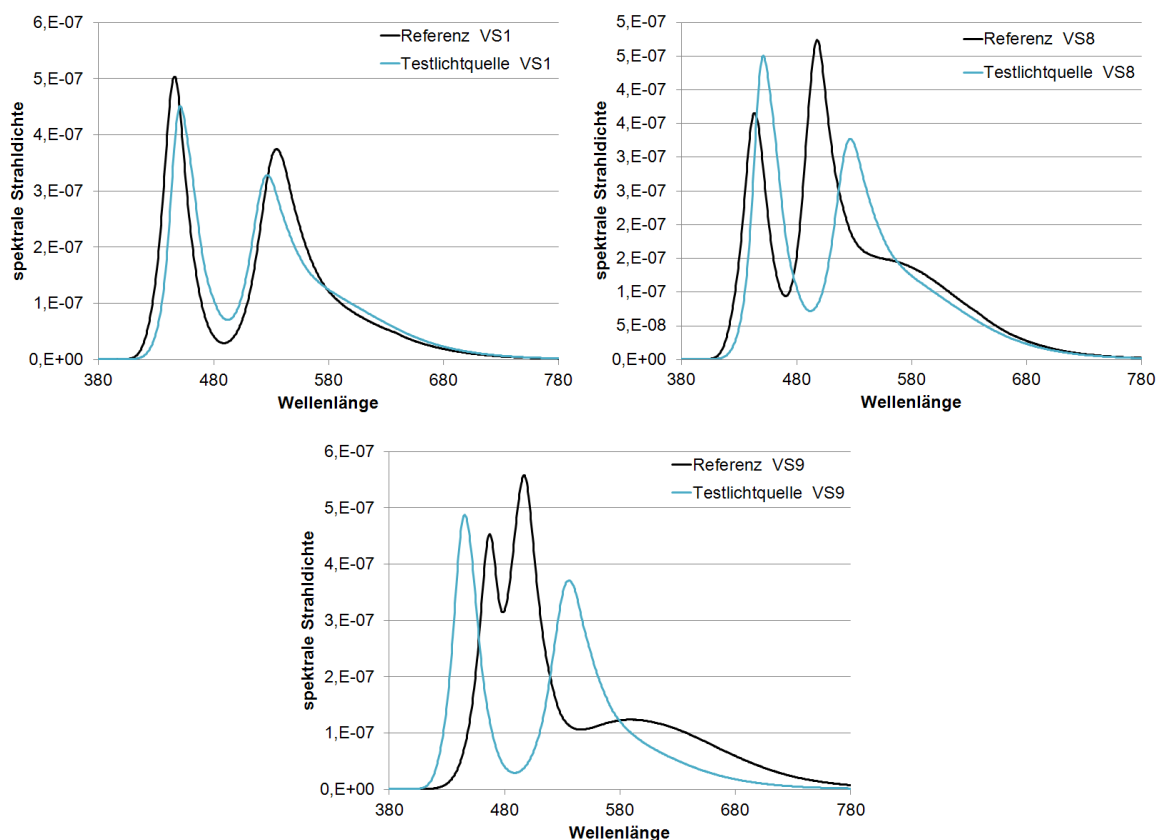


Abbildung 3.7 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF3, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

3.5 Lichtfarben

Zwei unterschiedliche Sätze an Lichtfarben wurden für die Untersuchungen verwendet. Lichtfarbensatz 1 enthält ungesättigte Lichtfarben mit Farbörtern auf dem Kurvenzug des Planckschen Strahlers. Lichtfarbensatz 2 beinhaltet eine Gruppe gesättigter Farben, mit denen die Relevanz der Aussagen aus den Untersuchungen anhand der weißen Lichtfarben für den gesamten Farbraum bestätigt werden soll. Zunächst wird die Farbwahrnehmung im Bereich ungesättigter Farben besonders genau untersucht. Die in der Flugzeugkabinenbeleuchtung verwendeten Lichtfarben orientieren sich an den Farbörtern natürlicher Strahler, um ein möglichst natürliches Ambiente zu schaffen. Drei Farbörter im Bereich der ungesättigten Farben wurden in die Untersuchungen einbezogen. Die Wahl fiel auf drei Farbörter auf dem Planckschen Kurvenzug bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K. Diese Farbtemperaturen decken den Bereich typischer Lichtfarben in der Flugzeugkabinenbeleuchtung in einem Bereich von warmweißer bis tageslichtweißer Beleuchtung ab. Die Farbörter dieser Spektren wurden im $u'v'$ -Farbraum nach CIE1976 basierend auf den 2° Normspektralwertfunktionen von 1931 ermittelt. Für den Satz gesättigter Farben (Lichtfarbensatz 2) wurden fünf Lichtfarben ausgewählt,

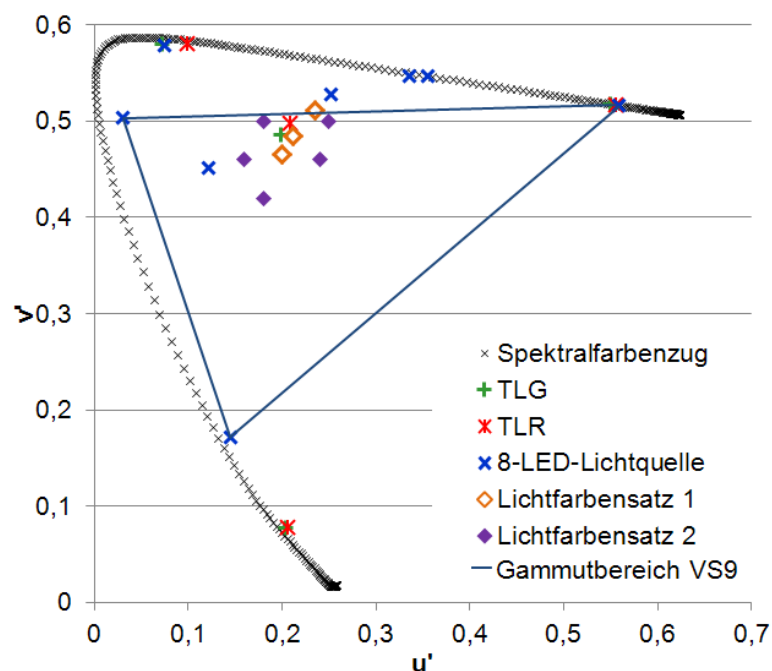


Abbildung 3.8 – Farbörter der beiden untersuchten Lichtfarbensätze 1 und 2 im UCS- $u'v'$ -Diagramm, basierend auf den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931.

deren Farbörter in möglichst gleichem Abstand um die Farbörter des Lichtfarbensatzes 1 liegen. Zudem müssen alle Farbörter die Bedingung erfüllen, dass sie innerhalb der Gamutbereiche der in den Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 verwendeten Lichtquellen liegen. Abbildung 3.8 zeigt die Farbörter der untersuchten Lichtfarben im UCS- $u'v'$ -Diagramm basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1931. Tabelle 3.7 gibt die Farbörter aller Lichtfarben in $u'v'$ -Koordinaten basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1931 an.

Tabelle 3.7 – $u'v'$ -Koordinaten aller untersuchten Lichtfarben.

| | Bezeichnung | u' | v' |
|-------------------|---------------|--------|--------|
| Lichtfarbensatz 1 | 3500 K | 0,2354 | 0,5113 |
| | 5000 K | 0,2112 | 0,4848 |
| | 6500 K | 0,2006 | 0,4658 |
| Lichtfarbensatz 2 | TF1 (Orange) | 0,2500 | 0,5000 |
| | TF2 (Grün) | 0,1800 | 0,5000 |
| | TF3 (Cyan) | 0,16 | 0,4600 |
| | TF4 (Blau) | 0,1800 | 0,4200 |
| | TF5 (Magenta) | 0,2400 | 0,4600 |

3.6 Probandengruppe

Die untersuchte Probandengruppe bestand aus 10 Männern und 10 Frauen. Die Altersverteilung ist in Abb 3.9 dargestellt. Das durchschnittliche Alter lag bei (30 ± 6) Jahren. Alle Probanden wurden mittels der Farbtafeln von Velhagen [Vel64] und dem entsättigten Farblegetest von Lanthony [LAN] negativ auf Farbfehlsichtigkeiten getestet. Die meisten der Probanden benutzen im Alltag eine Sehhilfe und verwendeten diese auch während der Tests. Der Wissensstand der Testpersonen über Farbmatrik und visuelle Abgleichversuche variierte von Experten bis hin zu absoluten Laien auf dem Gebiet der Farbmatrik. Es ließ sich keinerlei Zusammenhang zwischen dem farbmatriken Kenntnisstand der Versuchspersonen und deren Abgleichergebnissen erkennen. Eine weitere Probandin im Alter von 26 Jahren wurde untersucht und aus der Gesamtgruppe ausgeschlossen, da ihre Ergebnisse sich deutlich von den Ergebnissen der anderen Probanden unterschieden. Die Vermutung liegt

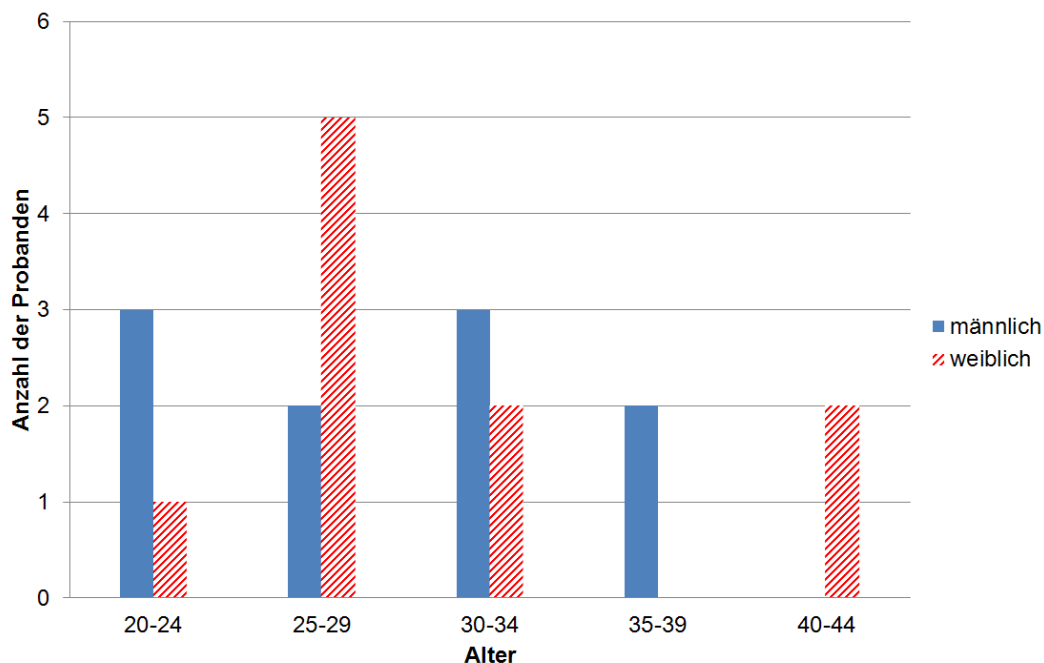


Abbildung 3.9 – Altersverteilung der Probandengruppe (n=20). Das durchschnittliche Alter lag bei (30 ± 6) Jahren.

nahe, dass sich entweder das Makulapigment oder die Zapfendichte bei dieser Versuchsperson deutlich vom Durchschnitt der Testgruppe unterscheidet. Die Ergebnisse dieser Testperson werden gesondert in Kapitel 4.1.2.1 behandelt.

3.7 Beobachterfeldgröße

Die Farbwahrnehmung hängt von der Beobachterfeldgröße ab, unter der ein Reiz betrachtet wird [WS00] (S.373). Allerdings ist nicht klar, in welchem Maß dieser Einfluss bei unterschiedlichen Spektralzusammensetzungen zum Tragen kommt. Beschäftigt man sich mit visuellen Abgleichtests und Spektralwertfunktionen, gilt es am Anfang einer jeden Untersuchung die Versuchsbedingungen festzulegen und damit auch eine definierte Beobachterfeldgröße

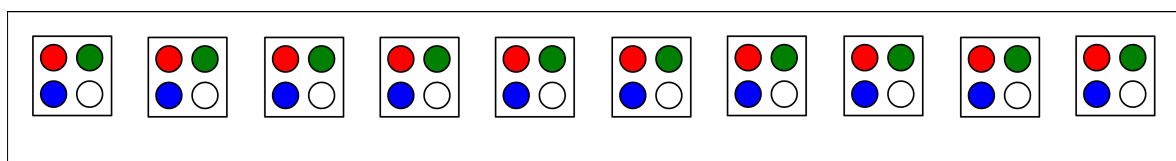


Abbildung 3.10 – Schematische Darstellung eines LED-Boards mit 10 LED-Clustern mit jeweils einer roten, blauen, grünen und weißen LED. Ein Board stellt die kleinste ansteuerbare Lichteinheit innerhalb der Flugzeugkabine dar.

zu bestimmen. In der Praxis lässt sich selten eine genaue Beobachterfeldgröße bestimmen, unter welcher zwei aneinander grenzende Lichteinheiten exakt betrachtet werden. Die kleinste steuerbare Einheit bei der Beleuchtung der Flugzeugkabine besteht aus einem LED-Board auf dem mehrere Cluster von LEDs, bestehend aus einer weißen und mehreren farbigen LEDs, bestückt sind (siehe schematische Abbildung 3.10). Ein LED-Board ist die kleinste Einheit, die charakterisiert und einzeln angesteuert werden kann. Ein Board wird in der Realität unter den unterschiedlichsten Winkeln und Entfernungen betrachtet. Abbildung 3.11 zeigt, dass selbst in einem kurzen Kabinenabschnitt zwei Boards mit 30 cm Länge teils unter Beobachterwinkeln kleiner als 2° und größer als 10° betrachtet werden. Daher ist es für die praktische Anwendung unerlässlich, den Einfluss der Beobachterfeldgröße zu berücksichtigen und damit auch diesen zu untersuchen. Da es nicht möglich ist, alle Feldgrößen in die Untersuchung mit einzubeziehen, wurden drei Beobachterfeldgrößen, 2° , 5° und 10° festgelegt, die bei jeder Untersuchung berücksichtigt werden.

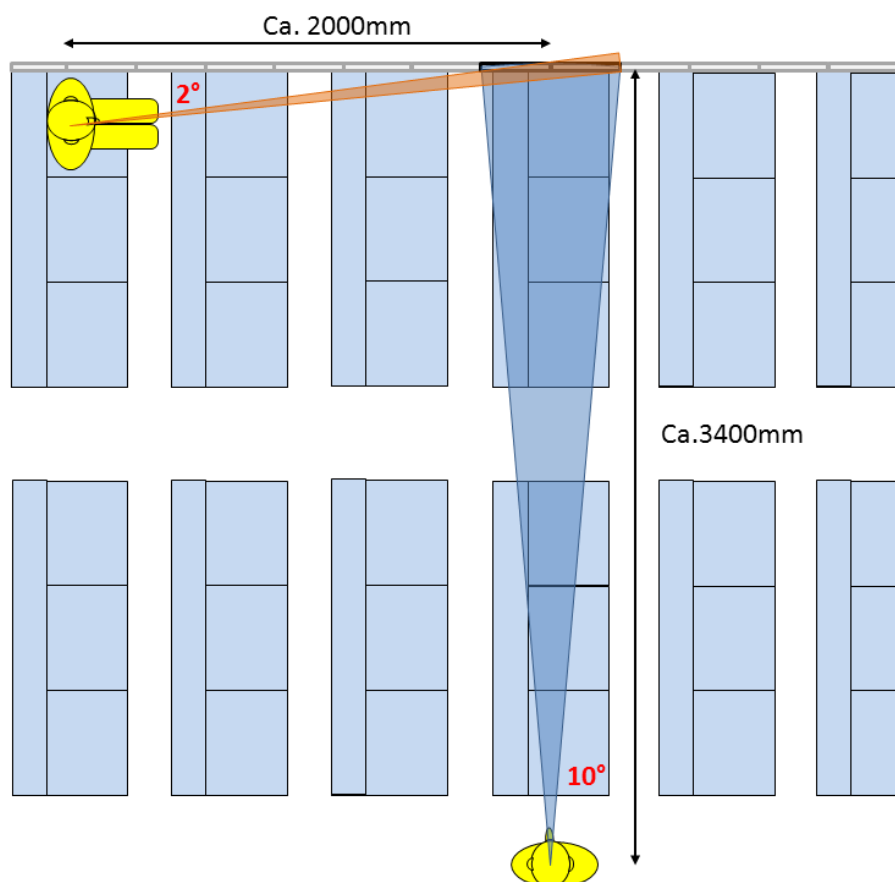


Abbildung 3.11 – Schematische Darstellung möglicher Betrachtungswinkel unter denen zwei Boards in der Flugzeugkabine beobachtet werden können.

Mehrere Gründe sprachen für die Auswahl genau dieser Testfeldgrößen. Die einzigen bisher von der CIE als Standard festgelegten Normspektralwertfunktionen gelten für den 2° und 10° Standardbeobachter. Eine weitere Empfehlung der CIE bezüglich der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen des Auges, der technische Report CIE170-1:2006 [TC-06], beinhaltet abgeleitete Sehzapfen-Grundfunktionen für Beobachterfeldgrößen zwischen 1° und 10° . Dies sind die einzigen validierten Wichtungsfunktionen für das menschliche Farbsehen auf die sich diese Arbeit stützen kann. Zudem stellte sich in Voruntersuchungen heraus, dass innerhalb dieses Bereiches die größte Änderung der Farbwahrnehmung auftritt. Die Wahl fiel zudem auf das 2° -Beobachterfeld im Gegensatz zum 1° -Beobachterfeld, da in der Praxis bis heute mit dem 2° -Normbeobachter gerechnet wird und auch die gängigen integrativen Messsysteme mit diesen Normspektralwertfunktionen arbeiten. Um hierfür die genaue Diskrepanz zwischen Wahrnehmung und Messwert ermitteln zu können, wurde das 2° -Beobachterfeld in die Untersuchungen aufgenommen. Als weitere Beobachterfeldgröße wurde ein 5° -Beobachterfeld in die Untersuchungen integriert. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sollen zeigen, ob die Änderung der Farbwahrnehmung bedingt durch eine Änderung der Beobachterfeldgröße linear verläuft oder einen anderen Verlauf in der $u'v'$ -Farbtafel annimmt.

3.8 Ergebnisschema und statistische Datenauswertung

3.8.1 Farbabgleichversuche

Die Berechnung der Farbörter und Farbabstände zur Auswertung der Ergebnisse der Abgleichtests wird entsprechend der Veröffentlichung CIE 15:2004 [TC-04] der CIE in der UCS- $u'v'$ -Farbtafel von 1976 vorgenommen. Auf die Berechnung der Farbdifferenzen in einem dreidimensionalen Farbraum kann verzichtet werden, da die verglichenen Referenz- und Testspektren so eingestellt wurden, dass sie dieselbe Leuchtdichte aufwiesen. Zudem ist es bei der Bewertung unterschiedlicher Lichtfarben nicht möglich festzulegen, welches der Testspektren als Referenzweiß dienen sollte. Die Formeln zur Berechnung

der Farbkoordinaten in der $u'v'$ -Farbtafel unter Verwendung der Normfarbwerte X , Y , Z oder der Normfarbwertanteile x , y sind in Gleichung 3.8 zu finden.

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Entsprechend der verwendeten Beobachterfeldgröße können hierfür sowohl die Normfarbwerte von 1931 X , Y , Z verwendet werden als auch die Normfarbwerte von 1964 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} [TC-04]. Da sich die Berechnung der $u'v'$ -Farbkoordinaten lediglich auf die Farbwerte bezieht, können zudem alle im Folgenden verwendeten und entwickelten Spektralwertfunktionen die Eingangswerte für die Berechnung der $u'v'$ -Koordinaten liefern. Der Farbabstand zwischen zwei Farbörtern u'_1, v'_1 und u'_2, v'_2 wird über die euklidische Distanz entsprechend Gleichung 3.9 berechnet:

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2} \quad (3.9)$$

Als Ergebnis jedes einzelnen Abgleichversuchs ergibt sich jeweils ein Testspektrum, das für einen Probanden unter einer bestimmten Beobachterfeldgröße visuell denselben Farbeindruck liefert wie das Referenzspektrum. Da der Abgleich bei jeder Farbtemperatur jeweils in den drei Beobachterfeldgrößen 2° , 5° und 10° durchgeführt wird, ergeben sich je Referenzspektrum drei dazugehörige Testspektren, die unter Beobachtung in der entsprechenden Feldgröße zu diesem Referenzspektrum visuell gleich sind. Die Abgleichergebnisse der Testlichtquelle in den Beobachterfeldgrößen 2° , 5° und 10° werden als Abgleichergebnis K (klein), M (mittel) und G (groß) bezeichnet. Für alle Referenz- und Testspektren können die $u'v'$ -Koordinaten basierend auf unterschiedlichen Spektralwertfunktionen errechnet werden. In einem Farbraum mit physiologisch wirksamen Achsen sollte der Abgleich in der entsprechenden Beobachterfeldgröße, für welche die Spektralwertfunktionen ermittelt wurden, denselben Farbort besitzen wie das Referenzspektrum. In einem Farbraum basierend auf spektralen Empfindlichkeitskurven für einen

2°-Standardbeobachter, sollte demnach das Ergebnis des im 2°-Beobachterfeld ermittelten visuellen Abgleichs, Abgleichergebnis K, entsprechend der Metameriedefinition auf denselben Farbort abgebildet werden wie das Referenzspektrum [WS00] (S.184). Stimmen die Spektralwertfunktionen nicht mit der Farbwahrnehmung der Probandengruppe überein, ergibt sich ein Bild entsprechend der schematischen Darstellung aus Abbildung 3.12. Referenzspektrum und visuell gleich wahrgenommenes Testlichtspektrum werden nicht auf denselben Farbort abgebildet. $\Delta u'v'_{K/M/G-Referenz}$ beschreibt den rechnerischen Farbabstand zwischen zwei visuell gleich wahrgenommenen Spektren. Dieser Farbabstand berechnet sich aus der euklidischen Distanz zwischen dem Farbort des Abgleichergebnisses des Probanden und dem Farbort der Referenzlichtquelle nach Gleichung:

$$\Delta u'v'_{K/M/G-Referenz} = \sqrt{(u'_{K/M/G} - u'_{Referenz})^2 + (v'_{K/M/G} - v'_{Referenz})^2} \quad (3.10)$$

Er beschreibt den Fehler, welcher in dem verwendeten System bei der Abbildung metamerer Spektren entsteht. Werden Spektren gleichen Farbreizes auf denselben Farbort abgebildet ergibt sich $\Delta u'v'_{K/M/G-Referenz} = 0$. In Kapitel 4.1.2 werden die unterschiedlichen Spektralwertfunktionen auf ihre Fähigkeit hin geprüft, metamere Spektren auf denselben Farbort abzubilden.

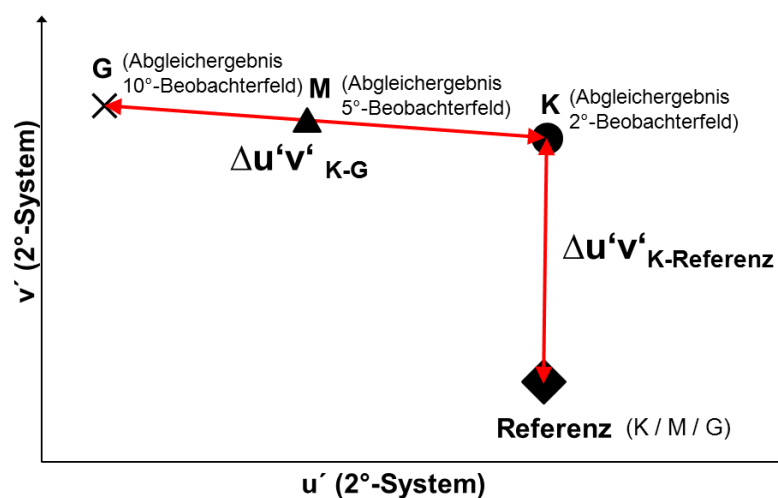


Abbildung 3.12 – Schematische Darstellung der Ergebnisse aus den Abgleichuntersuchungen bei Erfassung in einem nicht idealen Farbraum.

Da sich die Farbwahrnehmung mit der betrachteten Beobachterfeldgröße ändert, ergibt sich abhängig von der Spektralzusammensetzung der Vergleichsspektren ein Farbabstand zwischen Abgleichergebnis K und Abgleichergebnis G. $\Delta u'v'_{K-G}$ beschreibt den Farbabstand zwischen dem Abgleichergebnis unter Verwendung eines 2°-Beobachterfeldes und dem Abgleichergebnis unter Verwendung eines 10°-Beobachterfeldes. Ist dieser Farbabstand groß, bewirkt eine Änderung der Beobachterfeldgröße eine deutliche Änderung des wahrgenommenen Farbunterschieds zwischen Referenz- und Testlichtquelle. $\Delta u'v'_{K-G}$ sollte der visuell wahrgenommenen Farbdifferenz entsprechen, wenn ein im 2°-Beobachterfeld visuell gleicher Reiz in einem 10°-Beobachterfeld bewertet wird. Kapitel 5.3 beleuchtet diese Fragestellung genauer.

$$\Delta u'v'_{K-G} = \sqrt{(u'_K - u'_G)^2 + (v'_K - v'_G)^2} \quad (3.11)$$

3.8.1.1 Statistische Kennwerte

Die Ergebnisse der Abgleichuntersuchungen werden mit statistischen Kennwerten beschrieben. Mit Hilfe von statistischen Verfahren werden Schätzwerte für die einzelnen Parameter und deren Streuung berechnet. Für die zuvor beschriebenen Farbdifferenzen, die zur Kennzeichnung der Qualität eines Satzes Spektralwertfunktionen dienen, werden die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardfehler bzw. Konfidenzintervalle für den Mittelwertschätzer ermittelt.

3.8.1.2 Boot-Strap-Verfahren

Die Voraussetzung für die Ermittlung statistischer Kennwerte ist in der Regel die Kenntnis der zugrunde liegenden Verteilungsfunktion der untersuchten Farbabstände. Aufgrund der geringen Probandenanzahl von 20 Versuchsteilnehmern kann nicht davon ausgegangen werden, dass der zentrale Grenzwertsatz der Statistik greift. Daher kann nicht automatisch eine Normalverteilung der Datengrundgesamtheit angenommen werden [Rum10] (S.240). Da die Verteilungsfunktion also im gegebenen Fall nicht bekannt ist, wird das Boot-Strap-Verfahren angewandt. Das Boot-Strap-Verfahren ermöglicht es dem Anwender „eine Vorstellung über die Variabilität des zu prüfenden

Stichprobenkennwerts zu gewinnen“ [Bor05] (S.132), ohne die Verteilungsfunktion der Daten zu kennen. Die Idee des Verfahrens besteht darin, die empirische Verteilung der Stichprobe selbst als Grundgesamtheit anzunehmen und auf dieser Grundlage Schätzwerte für Mittelwerte, Standardfehler und Konfidenzintervalle zu ermitteln [Che08] (S.9). Aus den vorhandenen n Datensätzen (hier $n=20$) wird k mal (hier $k=15$) mit Zurücklegen zufällig ein Datensatz gezogen. Dieses Vorgehen wird 1000 mal wiederholt. In dem hier beschriebenen Fall besteht ein Datensatz aus den Farbwörtern der Abgleichergebnisse K, M und G und dem dazugehörigen Farbwort der Referenzlichtquelle. Es ergeben sich 1000 Stichproben mit m Datensätzen. Für jede der 1000 Stichproben wird dann der Schätzwert für den zu untersuchenden Parameter ermittelt. In diesem Fall der Schätzwert der zu untersuchenden Farbdifferenz. Aus den 1000 Schätzwerten ergibt sich eine neue Verteilungsfunktion. Die Varianz dieser Verteilungsfunktion beschreibt die Streuung des Schätzwertes. Damit beschreibt die Varianz dieser neuen Verteilungsfunktion den Standardfehler $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ des Schätzwertes \bar{x} [Che08] (S.50). Zudem kann aus der neuen Verteilungsfunktion das Konfidenzintervall für die Streuung des Schätzwertes ermittelt werden, indem die Perzentile der neuen Verteilungsfunktion ermittelt werden. Um das Konfidenzintervall für eine 95%ige Eintrittswahrscheinlichkeit zu ermitteln wird das Intervall zwischen dem 2,5%-Perzentil und dem 97,5%-Perzentil bestimmt [Che08] (S.57). Für die Ermittlung der Streuung des Schätzwertes für die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K/M/G-Referenz}$ wird für jede der 1000 Stichproben die Farbdifferenz zwischen dem Mittelwert der $u'v'$ -Abgleichergebnisse und dem Farbwort der Referenzlichtquelle errechnet. Die Streuung dieses Schätzwertes kann dann aus der Verteilung dieser 1000 Farbdifferenzen als Standardfehler oder als Konfidenzintervall aus den Perzentilwerten ermittelt werden. Um den Standardfehler und das Konfidenzintervall für den Mittelwertschätzer der Farbdifferenz zwischen Abgleichergebnis K und G $\Delta u'v'_{K-G}$ zu ermitteln wird für jede der 1000 Stichproben die Farbdifferenz zwischen den Mittelwerten der $u'v'$ -Abgleichergebnisse K und G berechnet.

3.8.1.3 Mahalanobis-Ellipsen

Die Mahalanobis-Distanz entspricht einem euklidischen Distanzmaß, das bezüglich der korrelativen Beziehungen zwischen zwei Merkmalen bereinigt

ist [Bor05]. Die Mahalanobis-Distanz berücksichtigt die Korrelation zwischen den einzelnen Achsen. Mit ihr lassen sich Kurven gleicher Wahrscheinlichkeit (Mahalanobis-Ellipsen) errechnen. In dieser Arbeit werden 95%-Ellipsen verwendet, was einer konstanten Mahalanobisdistanz von 2,4477 entspricht. Das bedeutet 95 Prozent aller Datenpunkte liegen innerhalb dieser Ellipse. Die Berechnung der Mahalanobis-Distanz md zwischen einem Abgleichpunkt u'_1, v'_1 und dem mittleren Abgleichergebnis u'_m, v'_m erfolgt mit Gleichung 3.12:

$$md = \sqrt{\begin{bmatrix} u'_1 - u'_m \\ v'_1 - v'_m \end{bmatrix}^T C^{-1} \begin{bmatrix} u'_1 - u'_m \\ v'_1 - v'_m \end{bmatrix}} \quad (3.12)$$

Dabei gilt für die Kovarianzmatrix C :

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{u'}^2 & \rho_{u'v'} \sigma_{u'} \sigma_{v'} \\ \rho_{u'v'} \sigma_{u'} \sigma_{v'} & \sigma_{v'}^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Für die inverse Kovarianzmatrix C^{-1} ergibt sich damit:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{u'}^2(1 - \rho_{u'v'}) & \rho_{u'v'}/\sigma_{u'}\sigma_{v'}(1 - \rho_{u'v'}) \\ \rho_{u'v'}/\sigma_{u'}\sigma_{v'}(1 - \rho_{u'v'}) & 1/\sigma_{v'}^2(1 - \rho_{u'v'}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Will man im umgekehrten Sinne die Mahalanobis-Ellipsen für eine definierte Mahalanobis-Distanz angeben, so definiert man diese über den Neigungswinkel γ und die beiden Ellipsenhalbachsen a und b . Der Neigungswinkel der Ellipse berechnet sich nach Gleichung 3.15. Die beiden Halbachsen der 95%-Streuungsellipsen lassen sich mit den Gleichungen 3.16 und 3.17 ermitteln [Naw13].

$$\gamma = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\rho_{u'v'} \sigma_{u'} \sigma_{v'}}{\sigma_{u'}^2 - \sigma_{v'}^2} \right) \quad (3.15)$$

$$a = 2,4477 * \sqrt{(1 - \rho_{u'v'}^2) \left(\frac{\cos^2 \gamma}{\sigma_{u'}^2} - \frac{2\rho_{u'v'} \sin \gamma \cos \gamma}{\sigma_{u'} \sigma_{v'}} + \frac{\sin^2 \gamma}{\sigma_{v'}^2} \right)^{-1}} \quad (3.16)$$

$$b = 2,4477 * \sqrt{(1 - \rho_{u'v'}^2) \left(\frac{\sin^2 \gamma}{\sigma_{u'}^2} - \frac{2\rho_{u'v'} \sin \gamma \cos \gamma}{\sigma_{u'} \sigma_{v'}} + \frac{\cos^2 \gamma}{\sigma_{v'}^2} \right)^{-1}} \quad (3.17)$$

3.8.1.4 Testverfahren

Am Anfang dieses Kapitels wurde beschrieben, dass ein Satz Spektralwertfunktionen umso besser ist, je geringer der Farbabstand $\Delta u'v'_{K/G-Referenz}$ für die entsprechende Beobachterfeldgröße wird. In der Auswertung der Abgleichergebnisse werden unterschiedliche Spektralwertfunktionen auf diese Fähigkeit hin getestet. Um feststellen zu können, ob ein Satz Spektralwertfunktionen signifikant bessere Abbildungsergebnisse liefert als ein anderer Satz Spektralwertfunktionen, soll hier vorgestellt werden, wie dies getestet werden kann. Bei der Auswertung der Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K/G-Referenz}$ geht es darum, unterschiedliche Hypothesen zu testen. Zum einen wird getestet, ob die Verwendung neuer Spektralwertfunktionen zu einer Verringerung des Farbraumfehlers führt. Zum anderen wird überprüft, ob die Farbdifferenz auf Werte unter einer definierten Schwelle reduziert werden konnte. Um diese Hypothesen zu testen, werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Zum einen kann in einfachen Fällen, bei denen sich die 95%-Konfidenzintervalle der zu vergleichenden Farbdifferenzen nicht überlappen auf dieser Grundlage von einem signifikanten Unterschied zwischen den beiden Farbdifferenzen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p kleiner als das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ausgegangen werden. Dasselbe gilt für die Aussage, dass die Farbdifferenz kleiner als ein vorgegebener Testwert ist. Liegt das gesamte Konfidenzintervall unter dem genannten Testwert, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p \leq 0,05$ davon ausgegangen werden, dass der Mittelwert der Farbdifferenzen geringer als dieser Testwert ist.

Überlappen sich die Konfidenzintervalle der beiden Farbdifferenzen, die auf ihre Unterschiedlichkeit getestet werden sollen, wird ein t-Test zum Vergleich zweier Stichprobenmittelpunkte aus unabhängigen Stichproben durchgeführt. Obwohl beide Stichproben auf den Ergebnissen derselben Abgleichergebnisse basieren, wird von unabhängigen Stichproben ausgegangen, da durch die Anwendung des Boot-Strap-Verfahrens die Information über die Zusammengehörigkeit der einzelnen Ergebnispaaare nicht mehr zur Verfü-

gung steht. Die beiden unabhängigen Stichproben werden auf die Nullhypothese H_0 hin getestet, dass die Stichproben aus Populationen stammen deren Mittelwerte μ_1 und μ_2 identisch sind [Bor05] (S.140):

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Die gerichtete Alternativhypothese H_1 lautet:

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

Die Bedeutsamkeit der Abweichung der gefundenen Differenz zwischen den beiden Mittelwerten der Stichproben \bar{x}_1 und \bar{x}_2 von der Differenz der Populationsparameter $\mu_1 - \mu_2$ wird in Relation zur Streuung der Mittelwertdifferenz ($\hat{\sigma}_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}$) ermittelt [Bor05] (S.140):

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\hat{\sigma}_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}} \quad (3.18)$$

Mit $\mu_1 - \mu_2 = 0$ entsprechend der Nullhypothese H_0 folgt daraus:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\hat{\sigma}_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}} \text{ mit } \hat{\sigma}_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} = \sqrt{\hat{\sigma}_{\bar{x}_1}^2 + \hat{\sigma}_{\bar{x}_2}^2} \quad (3.19)$$

Die Signifikanz des t-Wertes kann dann anhand der t-Tabelle [Bor05] (S.819) ermittelt werden und die Nullhypothese dementsprechend entweder abgelehnt oder angenommen werden. Ist der t-Wert größer als der tabellierte t-Wert $t_{df, \alpha=0,05}$, so kann davon ausgegangen werden, dass die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p kleiner als $\alpha = 0,05$ abzulehnen ist. Damit gilt also die gerichtete Hypothese H_1 als bestätigt. Der zu verwendende Freiheitsgrad df lässt sich aus Gleichung 3.20 ermitteln:

$$df = n_1 + n_2 - 2 \quad (3.20)$$

3.8.2 Farbdifferenzbewertungen

Die Ergebnisse der einzelnen Farbdifferenzbewertungen werden mit ΔE_{sub} bezeichnet und nehmen ganzzahlige Werte zwischen 0 und 8 an (vgl. Tabelle 3.1). Da keine Aussage über die Abstände zwischen zwei Ausprägungen gemacht werden kann und die Farbdifferenzbewertungen ordinalskaliert sind,

werden hier nur Mediane und Quartile der Verteilungen aller Werte der Probandengruppe ermittelt.

3.8.2.1 Wilcoxon-Test

Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse interessiert zunächst, ob sich die Farbdifferenzbewertung $\Delta E_{sub,1}$ signifikant von der Farbdifferenzbewertung $\Delta E_{sub,2}$ unterscheidet. Bei den Farbdifferenzbewertungen handelt es sich um ordinalskalierte Daten. Die erhobenen Daten stammen von derselben Probandengruppe und sind demnach abhängig. Daher wird zur Überprüfung der Signifikanz des Unterschieds zwischen den beiden Farbdifferenzen ein Wilcoxon-Test zum Vergleich von zwei abhängigen Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz durchgeführt [Bor05] (S.153). Die zu testende Nullhypothese H_0 besagt, dass die beiden Stichproben aus Populationen stammen, die sich in ihrer zentralen Tendenz nicht unterscheiden. Dies wird getestet indem zunächst für jedes Messwertpaar (hier die Farbdifferenzbewertungen eines einzelnen Probanden) die Paardifferenz d_i berechnet wird. Die Beträge dieser Differenz werden dann in eine Rangreihe gebracht. Dabei werden die Rangplätze gekennzeichnet, die zu den Differenzen mit dem selteneren Vorzeichen gehören. Nulldifferenzen werden im weiteren Vorgehen nicht beachtet und die Anzahl m der Paardifferenzen wird um deren Anzahl reduziert. T beschreibt die Summe der Ränge mit dem selteneren Vorzeichen. T' die Summe der Ränge mit dem häufigeren Vorzeichen. Je deutlicher sich T und T' unterscheiden, desto unwahrscheinlicher ist die Nullhypothese. Aus der Tabelle der kritischen Werte für den Wilcoxon-Test [Bor05] (S.829) lässt sich entnehmen, welche T -Werte unterschritten werden müssen, um die Nullhypothese mit einem α -Fehler-Niveau von 0,025 bei einseitigem Test und m bewerteten Paardifferenzen ablehnen zu können [Bor05] (S.153).

3.8.2.2 Rangkorrelation

Eine weitere Fragestellung bei der Bewertung der wahrgenommenen Farbdifferenzen besteht darin zu überprüfen, wie stark die wahrgenommenen Farbdifferenzen mit den errechneten Farbabständen korrelieren. Hierzu werden zunächst die intervallskalierten errechneten Farbabstände in eine Rangreihe gebracht und dann der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ermittelt

[Bor05] (S.227). Dieser ist ein Maß für die Stärke eines monotonen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen, wobei der Zusammenhang nicht linear sein muss.

Der Spearmansche Korrelationskoeffizient lässt sich mit Gleichung 3.21 berechnen [Bor05] (S.232):

$$r_S = 1 - \frac{6 * \sum_{i=1}^n d_i^2}{n * (n^2 - 1)} \quad (3.21)$$

d_i beschreibt dabei die Differenz zwischen den Rangzahlen der zueinander gehörigen Wertepaare der wahrgenommenen Farbdifferenz ΔE_{sub} und des errechneten Farbabstands $\Delta u'v'_{K-G}$:

$$d = \text{rang}(\Delta E_{sub}) - \text{rang}(\Delta u'v'_{K-G}) \quad (3.22)$$

Die Signifikanzgrenzen für den einseitigen Test des Spearmansche Korrelationskoeffizient r_S auf Signifikanz sind der Literatur [BL03](Tabelle O, S. 397) zu entnehmen.

4 Neue Spektralwertfunktionen für das 2°- und 10°- Beobachterfeld

Grundbedingung für die farblich homogene Ausleuchtung einer Fläche ist der Gebrauch korrekter Spektralwertfunktionen, unter deren Verwendung visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbort abgebildet werden. In diesem Kapitel werden die genauen Untersuchungsmodalitäten und die Ergebnisse zur Untersuchung der Farbwahrnehmung bei LED-Spektren mit unterschiedlichen Spektralzusammensetzungen und deren Erfassung mit Spektralwertfunktionen beschrieben.

4.1 Side-by-Side Abgleichversuche

In Laboruntersuchungen wurden Side-by-Side Abgleichversuche durchgeführt mit dem Zweck die Farbwahrnehmung bei LED-Lichtquellen mit unterschiedlichen Spektralverteilungen systematisch unter stabilen Bedingungen zu erfassen. Die Umgebungsbedingungen wurden dabei an die Gegebenheiten in der Flugzeugkabine angepasst. Zahlreiche Versuchsszenarien mit unterschiedlichen Spektralverteilungen von Test- und Referenzspektren wurden getestet. Die Laboruntersuchungen verfolgten mehrere Ziele. Zum einen sollte festgestellt werden, in welchem Maße die Normspektralwertfunktionen bei der Abbildung visuell gleich wahrgenommener LED-Spektren auf denselben Farbort versagen und in welchem Zusammenhang dieses Versagen mit den Spektralzusammensetzungen der verglichenen Lichtquellen steht. Es soll festgestellt werden, ob bestimmte Wellenlängenbereiche besonders ausschlaggebend für dieses Versagen sind. Des weiteren sollen alle in Kapitel 2 vorgestell-

ten Normspektralwertfunktionen und Spektralwertfunktionen getestet und ein Modell entwickelt werden, dass für die untersuchten Spektralvergleiche den Farbraumfehler minimiert. Es gilt zu beachten, dass alle Schlüsse, die in dieser Arbeit gezogen werden auf den Untersuchungen von Einzelspektren beruhen. Bei der Auswahl der Versuchsszenarien wurde jedoch auf möglichst große Vielfalt der spektralen Differenzen zwischen Referenz- und Testlichtspektrum geachtet.

4.1.1 Versuchsdurchführung

Die Side-by-Side Farbabgleiche wurden im Versuchsaufbau aus Kapitel 3.2 durchgeführt. Alle 20 Probanden der Probandengruppe nahmen jeweils an sieben Abgleichsessions teil. In jeder Session wurde eines der Versuchsszenarien VS1 bis VS7 untersucht. Die untersuchten Lichtfarben entsprachen dem Lichtfarbensatz 1 mit ungesättigten Lichtfarben deren Farbörter auf dem Planckschen Kurvenzug bei Farbtemperaturen von 3500 K, 5000 K und 6500 K lagen. Die Abgleiche wurden jeweils im 2°-, 5°- und 10°-Beobachterfeld durchgeführt. Somit führte jeder Proband innerhalb einer Session insgesamt 9 Abgleiche durch. Eine Versuchssession dauerte in der Regel eine halbe Stunde. Eine Testperson machte maximal zwei Versuchssessionen direkt hintereinander, um die Leistungsfähigkeit nicht zu schwächen.

4.1.1.1 Versuchsbedingungen

Die Versuchsbedingungen wurden so gewählt, dass die Umgebungsbedingungen in der Flugzeugkabine möglichst genau nachgebildet wurden. Die Leuchtdichte der Abgleichfelder betrug zwischen 120 cd/m^2 und 145 cd/m^2 . Aufgrund der Maximalleistung einzelner LEDs erreichten manche der Referenzszenarien nicht die angestrebte Leuchtdichte von 145 cd/m^2 . Dieser Zielwert entspricht der mittleren Leuchtdichte im kritischen Bereich der Flugzeugkabinenwand, in dem das Licht benachbarter LED-Boards undurchmischt nebeneinander auf der Kabinenwand abgebildet wird. Mit den gegebenen Leuchtdichtewerten kann nach Schanda [Sch07] (S.37) davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Stäbchen auf das Farbsehen minimal ist. Die Leuchtdichte der Umgebungsbeleuchtung betrug 70 cd/m^2 .

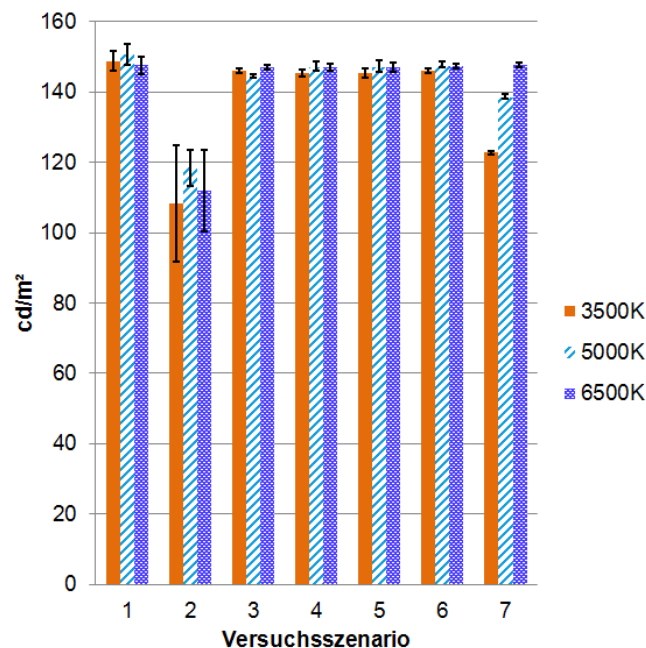


Abbildung 4.1 – Mittelwerte der Leuchtdichte auf der Referenzfläche für Versuchsszenarien VS1 bis VS7 für die untersuchten Lichtfarben mit Farbtemperaturen von 3500 K, 5000 K und 6500 K. Die eingetragenen Unsicherheiten stellen die Standardabweichung dar.

Abbildung 4.1 zeigt die Verteilung der Leuchtdichteniveaus der Referenzlichtquellen für die unterschiedlichen Versuchsszenarien VS1 bis VS7 mit angegebener Standardabweichung. In Tabelle A.1 im Anhang sind die dazugehörigen Werte zu finden. Die Streuung bei VS2 ist besonders hoch, da nach den ersten sieben Versuchen, die als Voruntersuchung durchgeführt wurden, das Leuchtdichteniveau auf 120 cd/m^2 angehoben wurde. Da sich kein Zusammenhang zwischen den Abgleichergebnissen und den Leuchtdichteniveaus für VS2 ergab, wurden die Vorversuche in die Gesamtuntersuchung integriert. Die Abweichungen im Leuchtdichteniveau der Referenzlichtquellen relativieren sich bei Betrachtung der großen Schwankung der von den Probanden eingestellten Leuchtdichten des Testfeldes (siehe Kapitel 4.1.3.1). Zudem ergaben die Ergebnisse der Untersuchung bei halbiert Helligkeit (siehe Kapitel 4.1.2.1, Abschnitt zur Intrabeobachterstreuung), dass eine Halbierung der Leuchtdichte keinen Einfluss auf die Abgleichergebnisse nimmt. Die Stabilität der eingestellten Farbörter der Referenzlichtquellen ist von besonders großer Bedeutung, da die aus den Abgleichversuchen resultierenden Farbdifferenzen als Maß für die Güte des untersuchten Farbraums gewertet werden. Tabelle A.2 im Anhang A.3 zeigt die Mittelwerte der $u'v'$ -Werte je

Versuchsszenario, gemittelt über alle Versuchssessionen, bei den drei unterschiedlichen Farbtemperaturen und die dazugehörigen Standardabweichungen. Die Standardabweichung liegt bei allen Versuchsszenarien unter einem Wert von 0,0005 für die u' - und v' -Koordinate. Damit liegen die Werte der Standardabweichung im Bereich der Grenzen der Einstell-Schrittweite der Testlichtquelle und bei den weiteren Untersuchungen kann mit den Mittelwerten gerechnet werden.

4.1.1.2 Versuchsablauf

Bevor die Testperson den ersten Abgleichversuch vornahm, wurde sie zunächst über die gewünschte Abgleichstrategie aufgeklärt. Während des gesamten Abgleichs sollte der Fokus des Probanden auf der Mitte der horizontalen Trennlinie liegen. Die Augenbewegungen sollten möglichst reduziert und der Blinzelreflex nicht bewusst kontrolliert werden. Der Proband bewegte sich in einem vier-Farb-System (siehe Kapitel 3.3.4), das mit den Gegenfarben Rot-Grün und Blau-Gelb arbeitete. In diesem System konnte der Proband frei entscheiden in welche Achsenrichtung und wie stark er die Testlichtfarbe ändern wollte. Zu Beginn jedes Abgleichvorgangs besaßen Umgebung, Referenz- und

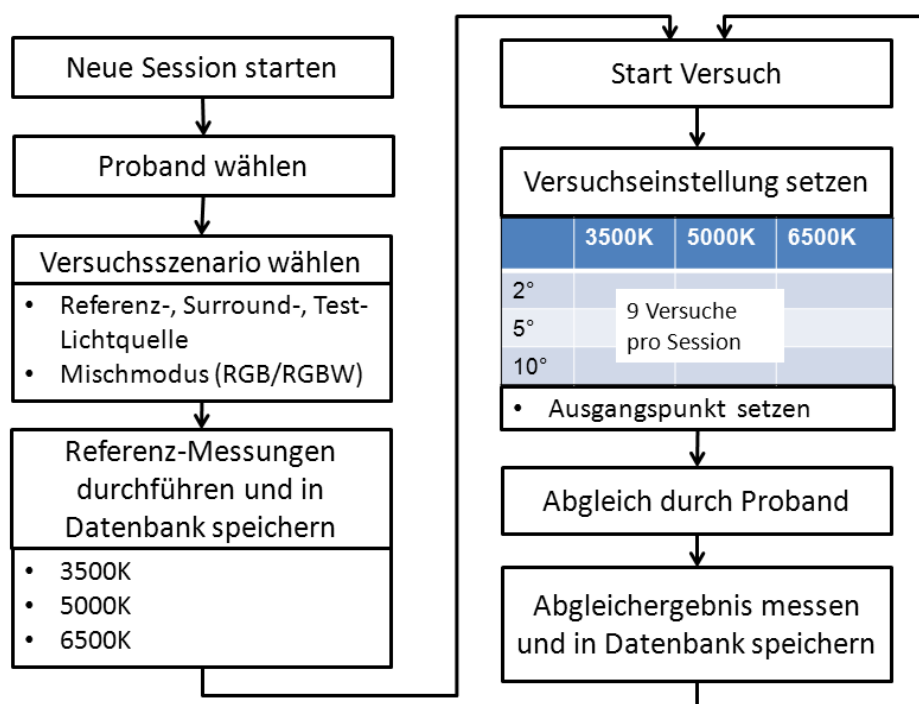


Abbildung 4.2 – Flussdiagramm des Versuchsablaufs der Side-by-Side Abgleichversuche.

Testfeld messtechnisch denselben Farbort im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1931. Die Helligkeit der Testlichtquelle wurde zu Beginn des Abgleichs so angepasst, dass Referenz- und Testfläche, bewertet mit der $V(\lambda)$ -Funktion der CIE von 1924, die gleichen Leuchtdichtewerte aufwiesen. Von dieser Ausgangssituation startend glich der Proband die Testlichtquelle visuell an die Referenzlichtquelle an. Konnte er ohne eine Anpassung der Leuchtdichte keine Übereinstimmung der beiden Felder erlangen, passte er die Helligkeit der Testfläche an. Danach wurde er angehalten, sich um den eingestellten Punkt herum noch einmal soweit in jede der vier Farbrichtungen zu bewegen bis er einen visuellen Unterschied erkennen konnte. Der eingestellte Farbort sollte möglichst mittig zwischen den erkennbaren Grenzen liegen. Dies diente dem Zweck, dass der Proband sich nicht zu früh mit einem mittelmäßigen Ergebnis zufrieden gab. Andernfalls hätte der Fehler auftreten können, dass das Ergebnis des Probanden immer leicht in die Richtung verschoben ist, aus der er sich dem gesuchten Farbort näherte. Weitere Untersuchungen zu dieser Problematik sind im Abschnitt zur Intrabeobachterunsicherheit in Kapitel 4.1.2.1 zu finden.

Abbildung 4.2 zeigt den Ablaufplan einer Versuchssession. Zunächst wählte der Versuchsleiter aus einer Liste den Probanden aus, der den Versuch in dieser Session durchzuführen hatte, damit dieser direkt in die Datenbank übernommen werden konnte. Dann wählte er entsprechend dem zu untersuchenden Versuchsszenario die zu verwendende Referenz- und Testlichtquelle aus. Vor jeder Abgleich-Session eines Probanden wurde die verwendete Referenzlichtquelle bei den drei untersuchten Farbtemperaturen vermessen und das Ergebnis in die Datenbank aufgenommen. Dies diente der Überprüfung der Stabilität der Referenz. Bei der Referenzmessung wurde der 10°-Ausschnitt der Drehscheibe in Position gebracht und die zu messende Farbtemperatur eingestellt. Nach einer Einschwingphase von 20 Sekunden wurde die Messung durchgeführt. Dies wiederholte sich für alle drei untersuchten Farbtemperaturen. Danach konnte der Versuch gestartet werden. Die Position des Top100 Messkopfs wurde so angepasst dass die Testfläche im Fokus lag. Der Proband begab sich in Position und stellte die Kinnstütze so ein, dass die Trennlinie zwischen Referenz- und Testfeld den Beobachterfeldausschnitt halbierte. Das Testfeld wurde immer mit beiden Augen gleichzeitig betrachtet. Je Versuchssession fanden neun Abgleiche statt. Bei jeder der drei

Farbtemperaturen wurde jeweils unter den Beobachterfeldgrößen 2°, 5° und 10° abgeglichen. Die Einstellung der Farbtemperatur und des Beobachterfeldausschnitts wurden vom Versuchsleiter vorgenommen. Es wurden zunächst alle drei Abgleiche in einer Farbtemperatur gemacht, bevor die Farbtemperatur gewechselt wurde. Die Auswahl der Abgleichreihenfolge wurde vom Versuchsleiter zufällig gewählt. Die Umgebungsbeleuchtung wurde der untersuchten Farbtemperatur angepasst. Nach jedem Abgleich des Probanden bewegte sich dieser von der Abgleichposition seitlich weg, um die Messstrecke zwischen TOP100 Messkopf und Testfeld frei zu geben und die Messung des Spektrums der Testlichtquelle zu ermöglichen. Das Abgleichergebnis des Probanden wurde in die Datenbank aufgenommen. Wurde die Farbtemperatur zwischen den Abgleichen umgeschaltet, wurde der Proband angehalten, solange auf die neue Situation zu adaptieren, bis er die Umgebung wieder als weiß wahrnahm, mindestens aber 2 Minuten, um eine vollständige chromatische Adaptation zu gewährleisten [FR95].

4.1.2 Abgleichergebnisse

Die Auswertung der Abgleichergebnisse beruht auf dem in Kapitel 3.8.1 beschriebenen Schema zur Ergebnisauswertung. Die Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ werden zunächst im UCS- $u'v'$ -Farbraum von 1976 basierend auf den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 ausgewertet. In einem weiteren Schritt werden die Normspektralwertfunktionen von 1931 und 1964 im Vergleich zu weiteren Spektralwertfunktionen für ein 2°- und 10°-Beobachterfeld auf ihre Fähigkeit getestet, visuell gleich wahrgenommene Spektren auf den gleichen Farbort abzubilden.

4.1.2.1 Darstellung mit Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931

Da in der Praxis bis heute hauptsächlich die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 in Gebrauch sind, wird zunächst ermittelt, wie groß der Fehler ist, der sich unter Verwendung dieser Normspektralwertfunktionen für die unterschiedlichen Versuchsszenarien ergibt. Da die Normspektralwertfunktionen von 1931 für einen 2°-Standardbeobachter ermittelt wurden, entspricht der Farbabstand $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ dem Farbraumfehler in diesem System

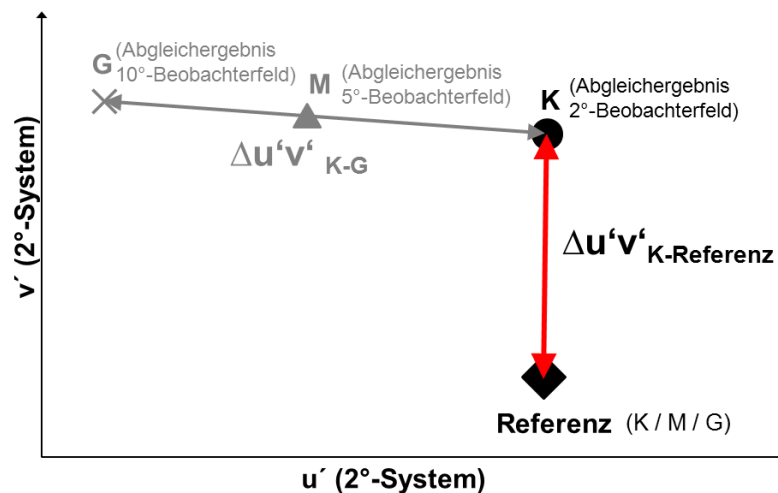


Abbildung 4.3 – Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$

(vgl. Abbildung 4.3). In Abbildung 4.4 sind im Diagramm auf der linken Seite die Mittelwerte der Farbörter der Abgleichergebnisse K aus den Abgleichen im 2°-Beobachterfeld sowie der Farbort der Referenzlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 dargestellt. Da die Berechnungen für die Ansteuerung der Referenzlichtquellen in diesem Farbraum erfolgten, besitzen in diesem Fall alle Referenzlichtquellen denselben Farbort. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Testspektren, die visuell denselben Farbeindruck wie die Referenzlichtquellen hervorrufen, auf unterschiedliche Farbörter abgebildet werden. Die Farbortverschiebung ist für alle Versuchsszenarien in v' -Richtung orientiert. In Abbildung 4.5 sind die Farbdifferenzen zwischen visuell gleichen Spektren je Versuchsszenario für die Abgleiche im 2°-Beobachterfeld bei 3500 K, 5000 K und 6500 K dargestellt. Abgebildet sind jeweils die Mittelwerte der Farbdifferenzen mit den dazugehörigen 95%-Konfidenzintervallen. Aus Tabelle 4.1 lassen sich die genauen Werte der Farbdifferenzen für alle Farbtemperaturen ablesen.

Die Farbraumfehler variieren zwischen $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0015$ für Spektren mit nahezu gleicher Spektralverteilung wie in Versuchsszenario VS2 und maximalen Farbdifferenzen von $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0165$ bei Versuchsszenario VS4, in dem ein kontinuierliches 8-LED-Spektrum als Referenzlichtquelle und TLR-RGBW als Testlichtquelle dienen. Der Fehler, der bei der Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren in den Farbraum ge-

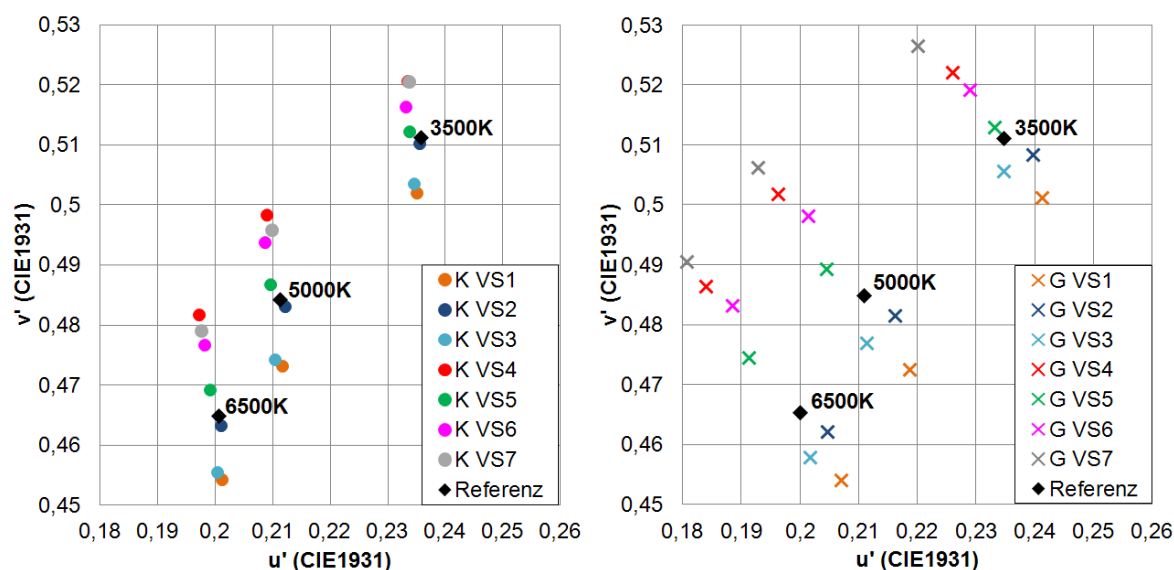


Abbildung 4.4 – Farbörter der, visuell auf die Referenzlichtquelle abgeglichenen, Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7. Mittelwerte der Abgleichergebnisse aller Probanden ($n=20$). Abgleichergebnisse K der Abgleiche im 2°-Beobachterfeld (links); Abgleichergebnisse G der Abgleiche im 10°-Beobachterfeld (rechts).

macht wird, hängt deutlich vom Versuchsszenario und damit von der spektralen Zusammensetzung der Vergleichsspektren ab. Trotz deutlich unterschiedlicher Spektraldifferenzen zwischen Referenz- und Testlichtspektrum werden sowohl Versuchsszenario VS2 als auch Versuchsszenario VS5 durch die Spektralwertfunktionen CIE1931 mit nur geringen Fehlern in der Farbraumabbildung modelliert. Betrachtet man die einzelnen Versuchsszenarien, so wird deutlich, dass nicht unbedingt die Versuchsszenarien mit großen Unterschieden in der Spektralverteilung auch größere Farbraumfehler erreichen müssen. Abbildung 4.6 zeigt die Referenz- und Testspektren von Versuchsszenario VS1 und VS6 zu Beginn des Abgleichvorgangs bei 5000 K. Während bei Versuchsszenario VS6 ein Vollspektrum mit einer RGB-Kombination verglichen wird, unterscheiden sich bei Versuchsszenario VS1 lediglich die Blauepeaks der weißen LEDs beim Vergleich zweier RGBW-Kombinationen. Die Fehlanpassung durch die Normspektralwertfunktionen von 1931 liegt bei Versuchsszenario VS1 ($\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0089..0,0117$) jedoch im gleichen Wertebereich wie bei Versuchsszenario VS6 ($\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0055..0,0116$). Allein vom scheinbar größeren spektralen Unterschied zwischen zwei Spektren kann also nicht auf das Maß des Farbraumfehlers geschlossen werden. Viel mehr entscheidet die Spektraldifferenz in bestimmten Wellenlängenbereichen über das Maß der Farbraumfehlabbildungen. Noch deutlicher wird

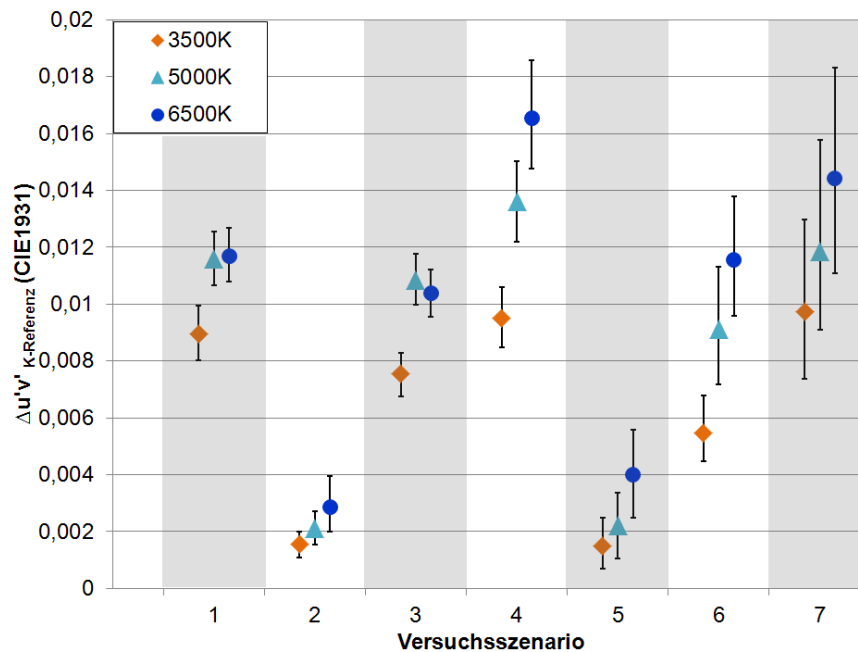


Abbildung 4.5 – Mittelwerte ($n=20$) und Konfidenzintervalle ($\alpha = 0,05$) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ bei der Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren in den Farbraum, unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931, für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7.

dies beim Vergleich der Spektren von Versuchsszenario VS4 und Versuchsszenario VS7 (vergleiche Abbildung 4.7). Der Farbabstand zwischen den visuell gleichen Spektren ist beim Vergleich der versetzten Peakspektren aus Versuchsszenario VS7 mit $\Delta u'v'_{Referenz-K(CIE1931)} = 0,0097..0,0144$ nicht signifikant unterschiedlich zu den Farbraumfehlern bei Versuchsszenario VS4 mit $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0095..0,0165$.

Innerhalb eines Versuchsszenarios nimmt der Fehler in der Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren auf denselben Farbort für die meisten Versuchsszenarien mit zunehmender Farbtemperatur zu. Da sich bei den verwendeten Spektren mit steigender Farbtemperatur der kurzwellige Spektralanteil erhöht, wird die Hypothese formuliert, dass der größte Farbraumfehler bei der Modellierung der spektralen Empfindlichkeit des Auges im Bereich kurzer Wellenlängen zwischen 380 nm und 500 nm entsteht.

Die Ergebnisse aus den Abgleichuntersuchungen im mittleren Beobachterfeld mit einer Beobachterfeldgröße von 5° dienen dazu, den Verlauf der Änderung der Farbwahrnehmung zwischen 2° - und 10° -Beobachterfeld zu erfassen. Betrachtet man die Farbörter der Abgleichergebnisse M aus dem 5° -

Tabelle 4.1 – Mittelwerte der Farbabstände $\Delta u'v'_{K/G-Referenz(1931)}$ und dazugehörige 1,96fache Standardfehler $\hat{\sigma}$ für die einzelnen Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K. Die Farbabstände variieren stark abhängig von der spektralen Differenz zwischen Referenz- und Testspektrum; ebenso die Streuung.

| Versuchsszenario | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3500 K | | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0089 | 0,0015 | 0,0075 | 0,0095 | 0,0015 | 0,0055 | 0,0097 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0010 | 0,0005 | 0,0008 | 0,0011 | 0,0009 | 0,0012 | 0,0030 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0114 | 0,0051 | 0,0053 | 0,0140 | 0,0025 | 0,0099 | 0,0218 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0008 | 0,0004 | 0,0007 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0023 |
| 5000 K | | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0116 | 0,0021 | 0,0108 | 0,0136 | 0,0022 | 0,0091 | 0,0119 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0009 | 0,0006 | 0,0009 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0020 | 0,0035 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0143 | 0,0058 | 0,0081 | 0,0223 | 0,0078 | 0,0162 | 0,0286 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0010 | 0,0004 | 0,0005 | 0,0013 | 0,0007 | 0,0017 | 0,0023 |
| 6500 K | | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0117 | 0,0029 | 0,0104 | 0,0165 | 0,0040 | 0,0116 | 0,0144 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0009 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0019 | 0,0016 | 0,0021 | 0,0036 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0135 | 0,0054 | 0,0081 | 0,0265 | 0,0125 | 0,0213 | 0,0323 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0007 | 0,0006 | 0,0006 | 0,0019 | 0,0011 | 0,0021 | 0,0034 |

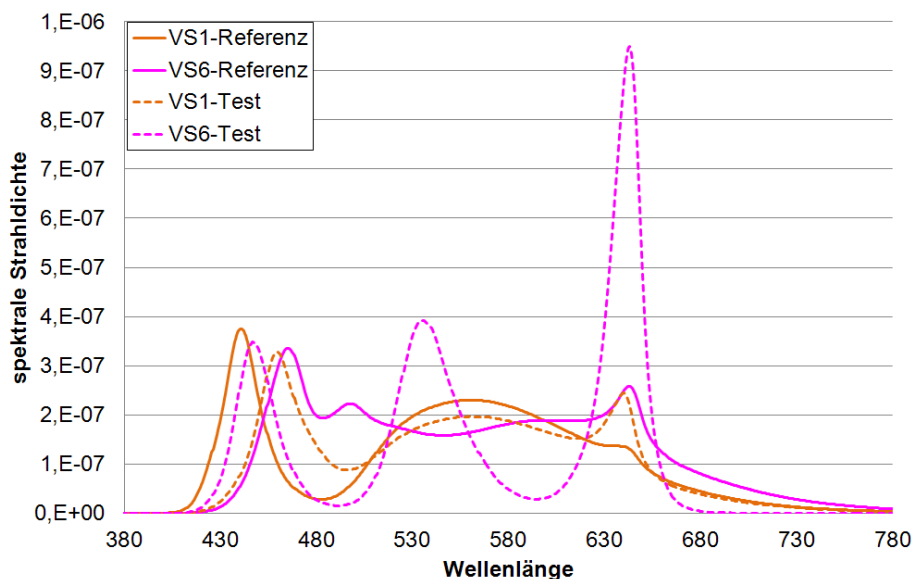


Abbildung 4.6 – Referenz- und Testspektren der Versuchsszenarien VS1 und VS6 zu Beginn des Abgleichvorgangs bei 5000 K.

Beobachterfeld, zeigt sich, dass diese immer auf der Verbindung zwischen den Abgleichergebnissen K und G liegen. Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch an Versuchsszenario VS4 die Farbörter der Abgleichergebnisse aus kleinem, mittlerem und großem Beobachterfeld im $u'v'$ -Diagramm. Die Abgleicher-

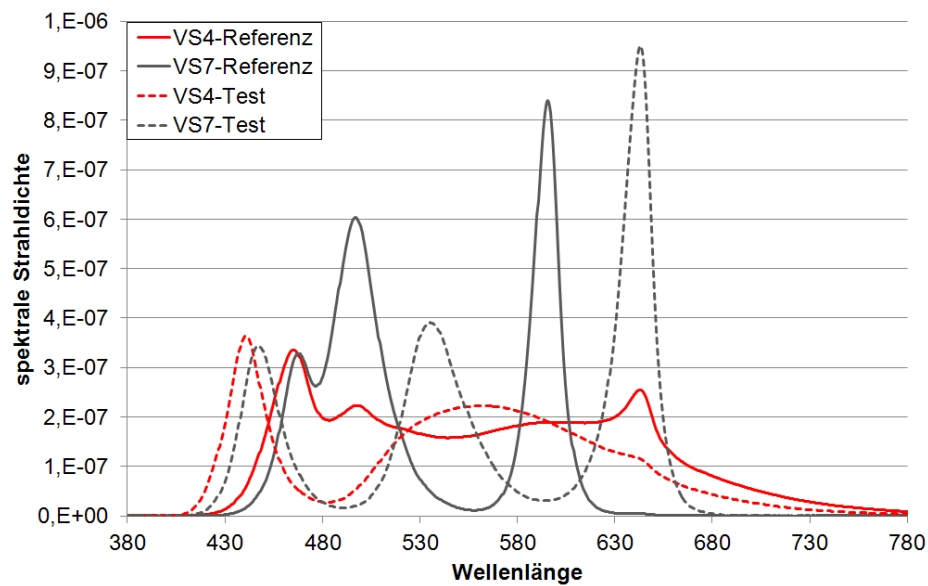


Abbildung 4.7 – Referenz- und Testspektren von Versuchsszenario VS4 und VS7 zu Beginn des Abgleichvorgangs bei 5000 K.

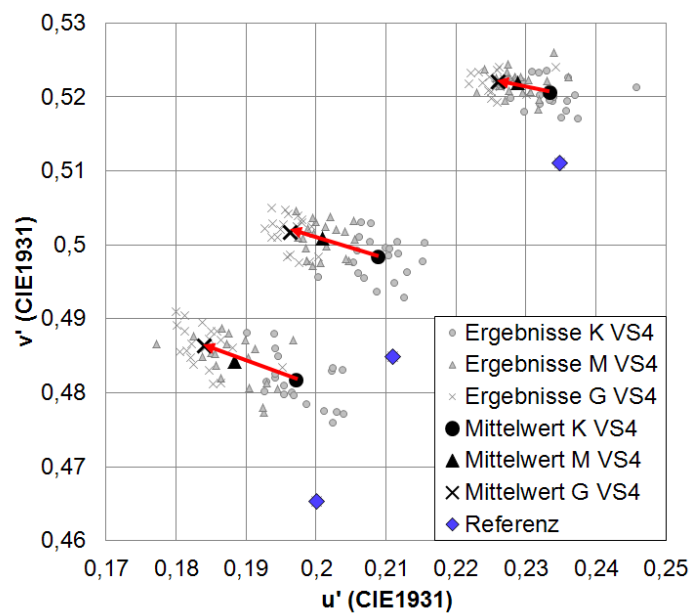


Abbildung 4.8 – Abgleichergebnisse K, M und G der Abgleiche im 2°-, 5°- und 10°-Beobachterfeld für Versuchsszenario VS4 (n=20).

gebnisse der anderen Versuchsszenarien zeigen denselben Zusammenhang (siehe Anhang A.4). Anhand der visuellen Bewertung wird deutlich, dass die Farbortverschiebung, bedingt durch eine Änderung des Beobachterfeldes, linear entlang einer Verbindungslinie verläuft. Daher konzentrieren sich alle weiteren Betrachtungen auf die Auswertung der Abgleichergebnisse K und G.

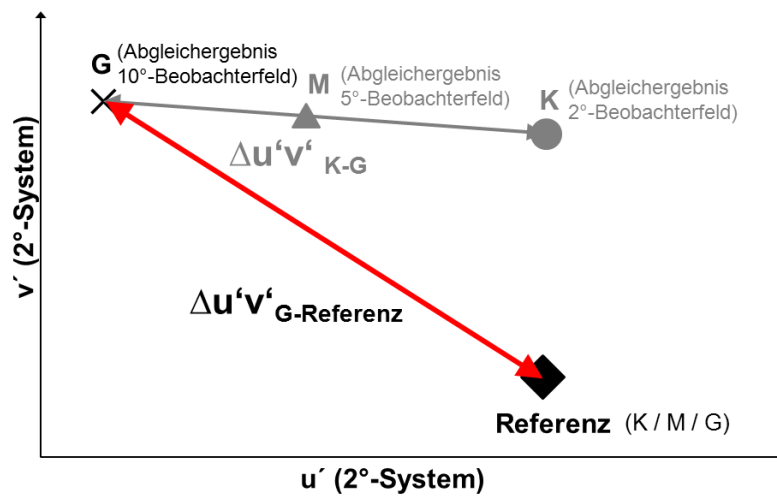


Abbildung 4.9 – Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$

Die meisten industriellen Anwendungen und integrierenden Messsysteme arbeiten mit den Kurven von 1931. Daher soll hier darauf eingegangen werden, wie groß der Fehler ist, der bei der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 und Bewertung der Testflächen in einem 10°-Beobachterfeld entsteht. Dies entspricht der Farbdifferenz $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$ schematisch dargestellt in Abbildung 4.9. Die Farbörter der Abgleichergebnisse aus dem 10°-Beobachterfeld sind in Abbildung 4.4 rechts dargestellt. Die Verschiebung ist hier nicht auf die v' -Komponente beschränkt. Zu der zuvor beschriebenen Fehlabbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren in den Farbraum unter Beobachtung im 2°-Beobachterfeld kommt nun noch die Farbdifferenz, die sich bei einem Wechsel der Beobachterfeldgröße ergibt, wenn Spektren in einer Feldgröße abgeglichen werden und von der Testperson unter einer anderen Beobachterfeldgröße betrachtet werden. Diese weitere Verschiebung kann also durch die 2°-Normspektralwertfunktionen nicht erfasst werden. Abbildung 4.10 zeigt die Farbdifferenzen zwischen visuell gleichen Referenz- und Testspektren unter Beobachtung im 10°-Beobachterfeld für Versuchsszenarien VS1 bis VS7. Die Zahlenwerte der Farbdifferenz $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$ sind in Tabelle 4.1 zu finden. Alle Versuchsszenarien mit Ausnahme von VS3 weisen größere Farbdifferenzen zwischen den visuell gleichen Spektren auf als unter 2°-Beobachtung. Der Maximalwert der Abweichung liegt nun bei $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)} = 0,0323$ und ist dem Versuchs-

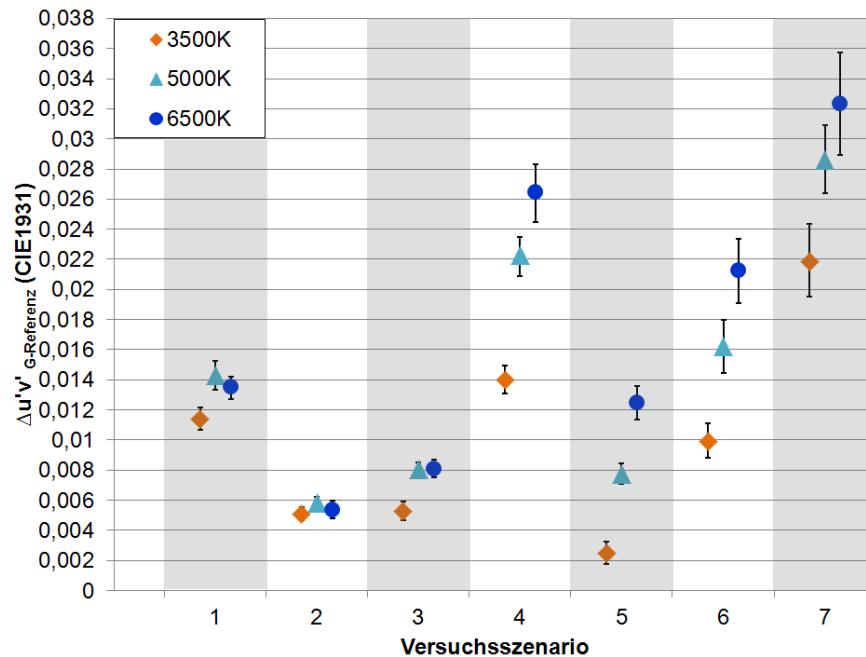


Abbildung 4.10 – Mittelwerte ($n=20$) und Konfidenzintervalle ($\alpha = 0,05$) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$ bei der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 für Beobachtungen in einem 10° -Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7.

szenario VS7 zuzuordnen. Die Farbdifferenz zwischen visuell gleicher Test- und Referenzlichtquelle erreicht für den Vergleich zweier RGBW-Spektren bei VS1 Werte bis zu $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)} = 0,0143$. Selbst beim Vergleich der RGB-Spektren des Versuchsszenario VS2 ergeben sich Farbdifferenzen bis zu $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)} = 0,0058$.

Aus den Ergebnissen der Auswertung mit den Normspektralwertfunktionen von 1931 wird deutlich, dass neue Spektralwertfunktionen für das 2° -Beobachterfeld benötigt werden, die visuell gleiche Spektren tatsächlich auf denselben Farbort abgleichen. Außerdem wird klar, dass die Farbwahrnehmung im 2° - und 10° -Beobachterfeld so unterschiedlich ist, dass kein einzelner Satz Spektralwertfunktionen die Farbwahrnehmung für beide Beobachterfeldgrößen gleichzeitig zufriedenstellend modellieren kann. Deshalb werden im weiteren Verlauf passende Spektralwertfunktionen sowohl für einen 2° -Standardbeobachter als auch für einen 10° -Standardbeobachter ermittelt. Die Farbdifferenzen aus den Abgleichversuchen im 2° -Beobachterfeld werden im Folgenden nur noch mit 2° -Funktionen bewertet und analog erfolgt die Bewertung der Abgleichergebnisse aus dem 10° -Beobachterfeld ausschließlich mit 10° -Funktionen.

4.1.2.1.1 Interbeobachterunsicherheit

Die Farbwahrnehmung der einzelnen Probanden unterscheidet sich deutlich voneinander. Dies liegt zum einen am Rezeptorsystem selbst. Sowohl die spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Zapfentypen, als auch die Verteilung der Zapfentypen in der Retina können von Proband zu Proband variieren. Zum anderen sorgt die unterschiedliche Dichte der Makula für unterschiedliche Farbwahrnehmungen der Probanden. Schon Wright schrieb 1964, dass diese Unterschiede zwischen einzelnen, nicht fehlsichtigen Probanden wahrscheinlich die größte Schwierigkeit in der Farbmeterik darstellen werden [Wri46] (S.51).

Abbildung 4.11 zeigt die Mahalanobis-Ellipsen für die Abgleichergebnisse aller Probanden für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7. Es wird deutlich, dass zum einen der Betrag der Streuung und zum anderen das Achsenverhältnis der Ellipsen, abhängig vom Versuchsszenario, stark variieren. Die Interbeobachterstreuung der Abgleichergebnisse ist stark abhängig von der spektralen Zusammensetzung der Vergleichsspektren. In Tabelle 4.2 sind die $\Delta u'v'$ -Werte der Achsenabschnitte der einzelnen Ellipsen aufgeführt. Für Versuchsszenario VS1 bis VS3 liegt das Achsenverhältnis der Ellipsen unter $a/b = 2$.

Tabelle 4.2 – Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ der Streuungsellipsen der Interbeobachterstreuung für die Abgleichergebnisse K und G bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K.

| | Feldgröße | CCT | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $a_{u'v'}$ | K | 3500 K | 0,0070 | 0,0035 | 0,0040 | 0,0097 | 0,0059 | 0,0106 | 0,0284 |
| | K | 5000 K | 0,0053 | 0,0034 | 0,0043 | 0,0091 | 0,0060 | 0,0141 | 0,0284 |
| | K | 6500 K | 0,0062 | 0,0052 | 0,0046 | 0,0121 | 0,0089 | 0,0152 | 0,0313 |
| $b_{u'v'}$ | K | 3500 K | 0,0046 | 0,0022 | 0,0024 | 0,0048 | 0,0028 | 0,0035 | 0,0041 |
| | K | 5000 K | 0,0047 | 0,0025 | 0,0021 | 0,0070 | 0,0020 | 0,0034 | 0,0041 |
| | K | 6500 K | 0,0048 | 0,0036 | 0,0024 | 0,0063 | 0,0036 | 0,0047 | 0,0064 |
| a/b | K | 3500 K | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 2,0 | 2,1 | 3,1 | 7,0 |
| | K | 5000 K | 1,1 | 1,3 | 2,0 | 1,3 | 2,9 | 4,2 | 7,0 |
| | K | 6500 K | 1,3 | 1,4 | 1,9 | 1,9 | 2,5 | 3,2 | 4,9 |
| $a_{u'v'}$ | G | 3500 K | 0,0045 | 0,0026 | 0,0034 | 0,0067 | 0,0049 | 0,0077 | 0,0136 |
| | G | 5000 K | 0,0050 | 0,0024 | 0,0025 | 0,0063 | 0,0034 | 0,0092 | 0,0136 |
| | G | 6500 K | 0,0046 | 0,0036 | 0,0033 | 0,0095 | 0,0057 | 0,0109 | 0,0129 |
| $b_{u'v'}$ | G | 3500 K | 0,0037 | 0,0017 | 0,0015 | 0,0033 | 0,0019 | 0,0022 | 0,0036 |
| | G | 5000 K | 0,0046 | 0,0022 | 0,0019 | 0,0044 | 0,0018 | 0,0044 | 0,0036 |
| | G | 6500 K | 0,0033 | 0,0028 | 0,0018 | 0,0056 | 0,0027 | 0,0044 | 0,0045 |
| a/b | G | 3500 K | 1,2 | 1,5 | 2,3 | 2,1 | 2,6 | 3,5 | 3,8 |
| | G | 5000 K | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,9 | 2,1 | 3,8 |
| | G | 6500 K | 1,4 | 1,3 | 1,9 | 1,7 | 2,1 | 2,5 | 2,9 |

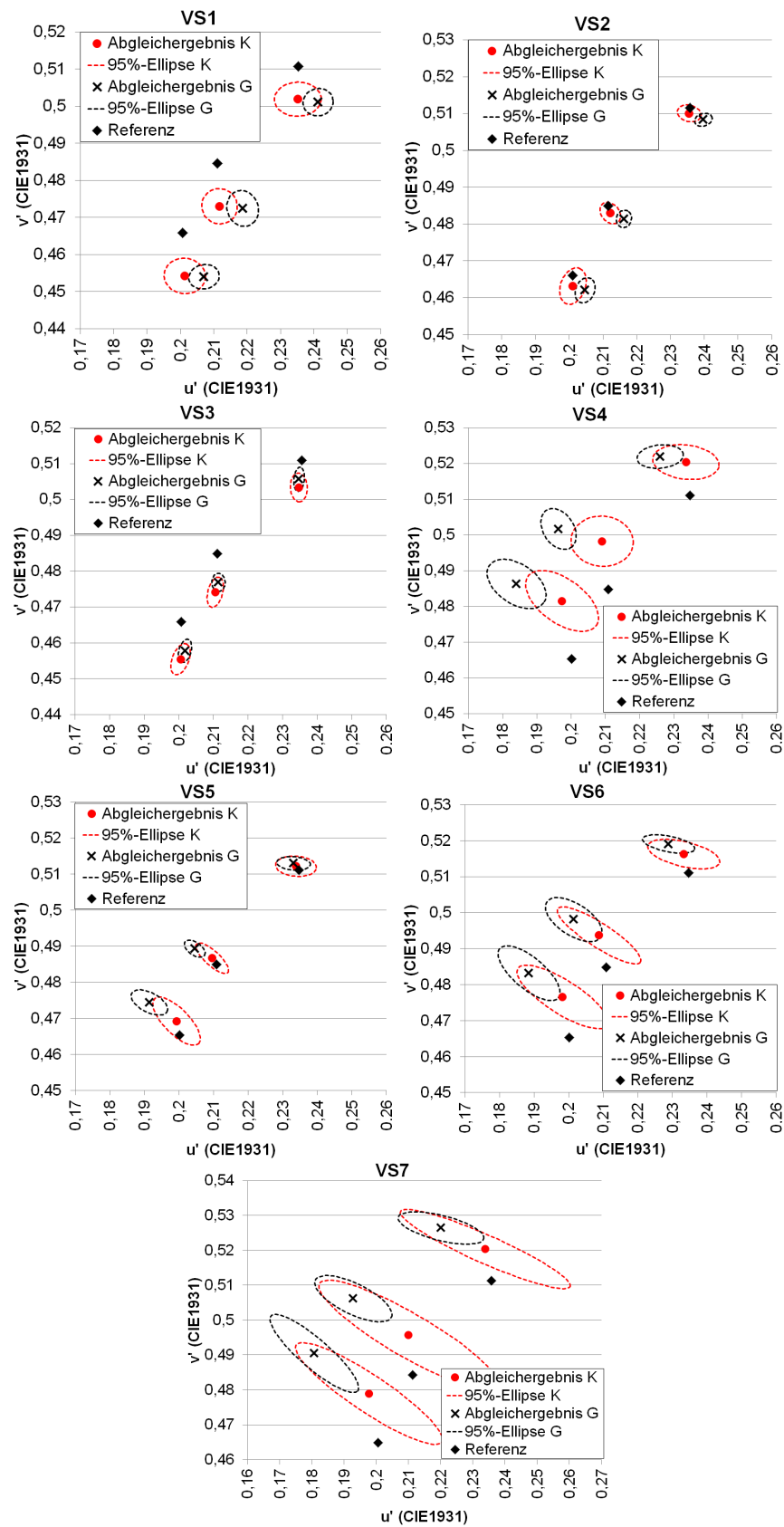


Abbildung 4.11 – Mahalanobis-Ellipsen der Abgleichergebnisse aller Probanden ($n=20$) ermittelt nach Boot-Strap-Verfahren für Versuchsszenario VS1 bis VS7.

Die Intrabeobachterstreuung ist bei den Versuchsszenarien VS2 und VS3 am kleinsten. Die Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ nehmen maximal Werte von 0,0052 an. Das Achsenverhältnis a/b erreicht für die Versuchsszenarien VS4 bis VS6 maximal Werte von $a/b = 4$. Die Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ nehmen hier maximal Werte von 0,0152 an. Bei Versuchsszenario VS7 erreichen das Achsenverhältnis a/b und der Achsenabschnitt a maximale Werte. Bei einem Achsenverhältnis von bis zu $a/b = 7$ erreicht Achsenabschnitt $a_{u'v'}$ Werte von 0,0313. Für alle Versuchsszenarien sind die Ellipsen der Abgleichergebnisse G kleiner als die der Abgleichergebnisse K. Die Interbeobachterstreuung ist also für die Abgleiche im 10°-Beobachterfeld durchschnittlich kleiner als für die Abgleiche im 2°-Beobachterfeld, trotz der in Kapitel 4.1.3.2 beschriebenen Inhomogenitäten beim Abgleich im großen 10°-Beobachterfeld. Die Neigung der Ellipsen entspricht für alle Versuchsszenarien in etwa der Orientierung der Farbortverschiebung zwischen dem Mittelwert der Abgleichergebnisse K und G. Daher ist zu vermuten, dass die Unterschiede in der Farbwahrnehmung der einzelnen Probanden denselben Mechanismen zuzuordnen sind, die auch die Unterschiede zwischen der Farbwahrnehmung in einem 2°- und 10°-Beobachterfeld hervorrufen.

4.1.2.1.2 Intrabeobachterunsicherheit

Als Intrabeobachterstreuung wird die Unsicherheit der Abgleichergebnisse einer einzelnen Testperson bei mehrmaliger Durchführung desselben Abgleichs bezeichnet. Um diese zu untersuchen, wurden drei der sieben Versuchsszenarien mit einem einzigen Probanden (Proband NR 31) an mehreren Tagen zu unterschiedlichen Uhrzeiten insgesamt 14 mal wiederholt. Für die Untersuchung der Intrabeobachterunsicherheit wurden die Versuchsszenarien VS1, VS3 und VS7 ausgewählt. VS1 ist in dieser Auswahl enthalten, da dieses Versuchsszenario der Ausgangspunkt für alle Untersuchungen war. Die Versuchsszenarien VS3 und VS7 wurden gewählt, da VS3 die geringste und VS7 die größte Interbeobachterstreuung aufweist. Es sollte die Frage untersucht werden, ob diese aus der Unsicherheit der einzelnen Probanden oder den Unterschieden in der Farbwahrnehmung der verschiedenen Probanden resultieren. Abbildung 4.12 zeigt die Ellipsen der Intrabeobachterstreuung (oben) im Vergleich zu den Ellipsen der Interbeobachterstreuung (unten). In Tabelle 4.3

Tabelle 4.3 – Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ der Streuungsellipsen der Intrabeobachterstreuung für die Abgleichergebnisse K und G bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K.

| | Feldgröße | CCT | VS1 | VS3 | VS7 |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| $a_{u'v'}$ | K | 3500 K | 0,0031 | 0,0029 | 0,0029 |
| | K | 5000 K | 0,0040 | 0,0035 | 0,0045 |
| | K | 6500 K | 0,0036 | 0,0038 | 0,0053 |
| $b_{u'v'}$ | K | 3500 K | 0,0024 | 0,0021 | 0,0028 |
| | K | 5000 K | 0,0023 | 0,0025 | 0,0038 |
| | K | 6500 K | 0,0021 | 0,0025 | 0,0043 |
| a/b | K | 3500 K | 1,3 | 1,4 | 1,0 |
| | K | 5000 K | 1,8 | 1,4 | 1,2 |
| | K | 6500 K | 1,8 | 1,5 | 1,2 |
| $a_{u'v'}$ | G | 3500 K | 0,0018 | 0,0019 | 0,0048 |
| | G | 5000 K | 0,0020 | 0,0015 | 0,0062 |
| | G | 6500 K | 0,0026 | 0,0022 | 0,0074 |
| $b_{u'v'}$ | G | 3500 K | 0,0011 | 0,0011 | 0,0019 |
| | G | 5000 K | 0,0014 | 0,0013 | 0,0045 |
| | G | 6500 K | 0,0011 | 0,0017 | 0,0042 |
| a/b | G | 3500 K | 1,6 | 1,7 | 2,5 |
| | G | 5000 K | 1,5 | 1,2 | 1,4 |
| | G | 6500 K | 2,4 | 1,3 | 1,7 |

sind die Werte der Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ und das Achsenverhältnis a/b der Intrabeobachter-Streuungsellipsen aufgeführt. Die Streuungsellipsen der Intrabeobachterstreuung sind für VS1 und VS3 sehr klein. Die Werte der Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ sind nahezu gleichgroß und liegen zwischen Werten von 0,0011 und 0,004. Für Versuchsszenario VS3 liegen Inter- und Intrabeobachterstreuung in derselben Größenordnung. Für Versuchsszenario VS1 ist dagegen die Interbeobachterstreuung im Mittel doppelt so groß wie die Intrabeobachterstreuung. Dies deutet darauf hin, dass sich die Farbwahrnehmung der einzelnen Probanden für die in Versuchsszenario VS1 verglichenen Spektren tatsächlich unterscheidet. Obwohl bei Versuchsszenario VS7 die Intrabeobachterstreuung deutlich größer ist als bei Versuchsszenario VS1 und VS3, liegt sie deutlich unter der Interbeobachterstreuung. Die Achsenabschnitte $a_{u'v'}$ und $b_{u'v'}$ nehmen Werte bis zu 0,0074 an und das Achsenverhältnis wird maximal zu $a/b = 2,5$. Die Ellipsen der Intrabeobachterstreuung sind deutlich kleiner als für die Interbeobachterstreuung und auch das Achsenverhältnis ist deutlich kleiner. Die massiven gerichteten Streuungen zwischen den Abgleichergebnissen der einzelnen Probanden sind demnach ein Zeichen dafür, dass die Farbwahrnehmung bei stark unterschiedlichen Spektren von Beobachter zu Beobachter deutlich variiert. Damit ist bei diesen Spektralver-

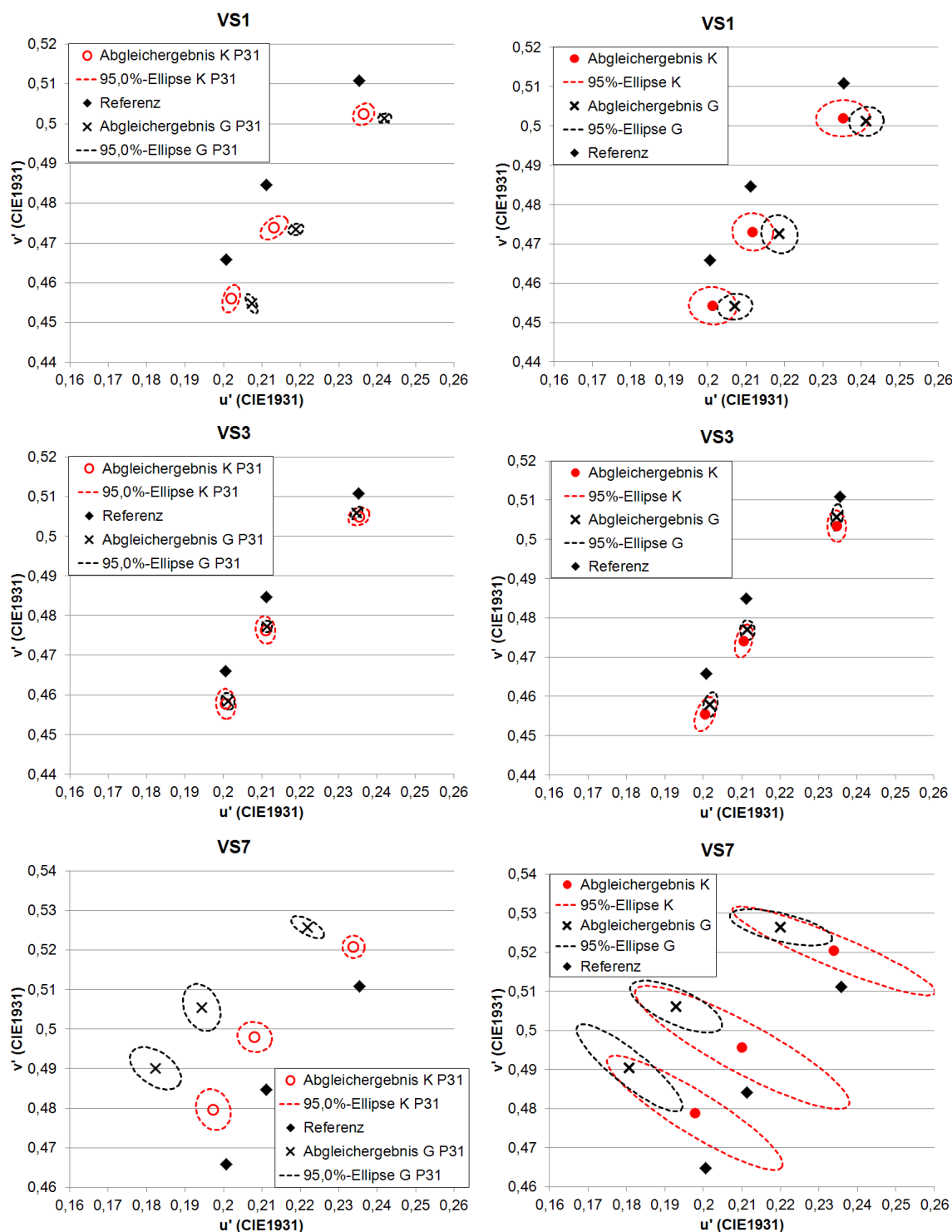


Abbildung 4.12 – Streuungsellipsen der wiederholten Abgleichergebnisse eines einzelnen Probanden ($n=14$) (links); Streuungsellipsen der Abgleichergebnisse aller Probanden ($n=20$) (rechts).

gleichen ein zufriedenstellender Abgleich der beiden Spektren unmöglich. Für die Versuchsszenarien VS1 und VS3 kann von einer mittleren Intrabeobachterstreuung von ca. $\Delta u^*v' = 0,0030$ für Abgleiche im 2°-Beobachterfeld

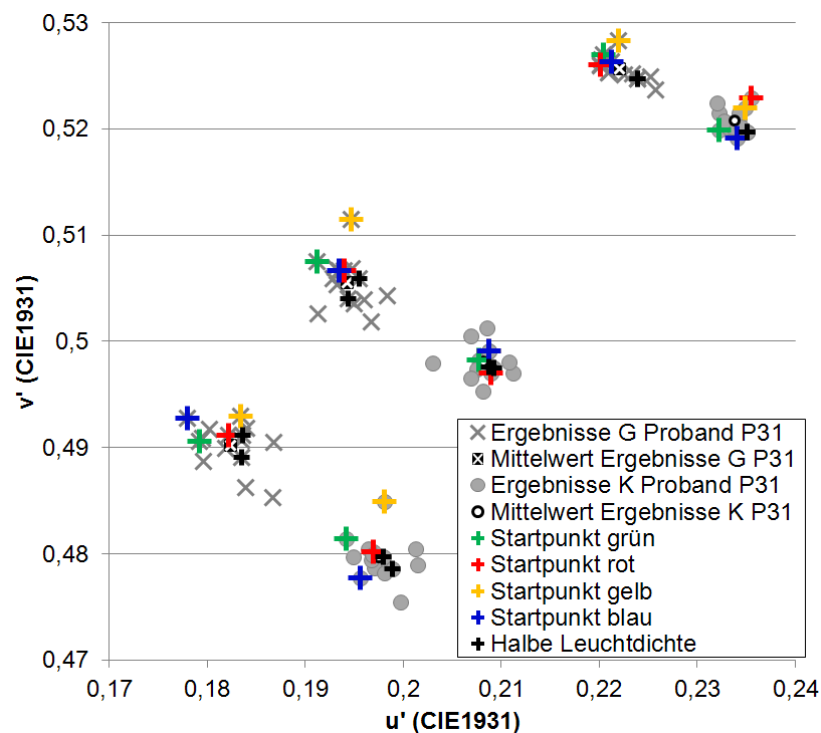


Abbildung 4.13 – Farbörter der einzelnen Abgleichergebnisse des Probanden P31 mit Unterscheidung der einzelnen Abgleichversuche mit unterschiedlichen Versuchsbedingungen und Startpunkten.

und ca. $\Delta u'v' = 0,0020$ für Abgleiche im 10° -Beobachterfeld ausgegangen werden. Die mittlere Intrabeobachterstreuung liegt bei VS7 im Mittel bei ca. $\Delta u'v' = 0,0050$.

Acht der 14 Versuche wurden unter den ursprünglichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Bei vier Versuchen wurde der Startpunkt der Testlichtquelle jeweils in eine der vier Ansteuerrichtungen verschoben. Die Testlichtquelle wurde zu Beginn des Abgleichs also deutlich grünlich, rötlich, bläulich oder gelblich dargeboten. Damit sollte ermittelt werden, ob die Testperson dazu neigt trotz vorgegebener Abgleichstrategie bereits vor Erreichen des tatsächlichen Abgleichpunkts den Versuch zu beenden. Zwei weitere Versuche wurden bei auf die Hälfte reduzierter Leuchtdichte der Referenzlichtquelle durchgeführt. Bei einem dieser Versuche wurde die Umgebungsbeleuchtung gleich gelassen. Bei dem anderen Versuch wurde auch die Leuchtdichte der Umgebungsbeleuchtung halbiert. In Abbildung 4.13 sind die Farbörter der einzelnen Abgleichergebnisse der Testperson P31 im UCS- $u'v'$ -Diagramm basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1931 dargestellt. Die Abgleichergebnisse mit farbigem Startpunkt und die Abgleichergebnisse bei hal-

bierter Helligkeit sind gesondert markiert. Die Abgleichergebnisse mit unterschiedlichen Startpunkten weisen keine systematische Verschiebung in die Ursprungsstartrichtung auf. Durch die vorgeschriebene Abgleichmethode kann also der Startpunkt des Abgleichs ohne Konsequenzen für das Abgleichergebnis frei gewählt werden. Die Abgleichergebnisse der Untersuchungen mit halbiertem Leuchtdichte setzen sich nicht von den anderen Ergebnissen ab. Die Leuchtdichte hat demnach in dem Bereich zwischen 70 cd/m^2 und 145 cd/m^2 keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Farbwahrnehmung.

4.1.2.1.3 Proband ohne 2°-10° Differenz

Eine Probandin nahm an den Probandentests teil und wurde dann aus der Auswertung zur Ermittlung passender Spektralwertfunktionen ausgeschlossen. Obwohl die Testperson mit den Farbtafeln von Velhagen [Vel64] und dem entsättigten Farblegetest von Lanthony [LAN] negativ auf Farbfehlsichtigkeiten getestet wurde, stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass bei ihr die Farbwahrnehmung im 2°-Beobachterfeld identisch mit der Farbwahrnehmung im 10°-Beobachterfeld ist. Die Farbwahrnehmung ändert sich nicht über die Beobachterfeldgröße. Abbildung 4.14 zeigt die Abgleichergebnisse K, M, G der Probandin P23 im Vergleich zu den Mittelwerten der Abgleichergebnisse der gesamten Probandengruppe mit zugehörigen 95%-Ellipsen für Versuchsszenario VS1, VS4, VS5 und VS7. Die Darstellung der Abgleichergebnisse aller weiteren Versuchsszenarien sind im Anhang A.7 zu finden. Die Abgleichergebnisse der Probandin P23 liegen für alle Beobachterfeldgrößen sehr nah beieinander und alle Ergebnisse liegen im erweiterten Bereich der 10°-Beobachterfeld-Abgleiche der anderen Testpersonen. Das Abgleichverhalten ließe sich erklären, hätte die Probandin nicht richtig fokussiert und daher alle Abgleiche in der Peripherie der Retina durchgeführt. Eine andere Erklärung wäre eine gleichmäßige Verteilung des Makulapigments in einem überdimensional großen Bereich der Retina. Ohne augenmedizinische Untersuchungen lässt sich die Ursache für das Abgleichverhalten der Probandin nicht eindeutig klären. Da bei normalsichtigen Personen davon ausgegangen wird, dass sie in einem gewissen Maße differierende Farbwahrnehmung bei einer Beobachterfeldgrößenänderung aufweisen und hier ein Normalbeobachter gesucht werden soll, wurden die Ergebnisse dieser Probandin aus den Auswertungen der gesamten Probandengruppe ausgeschlossen.

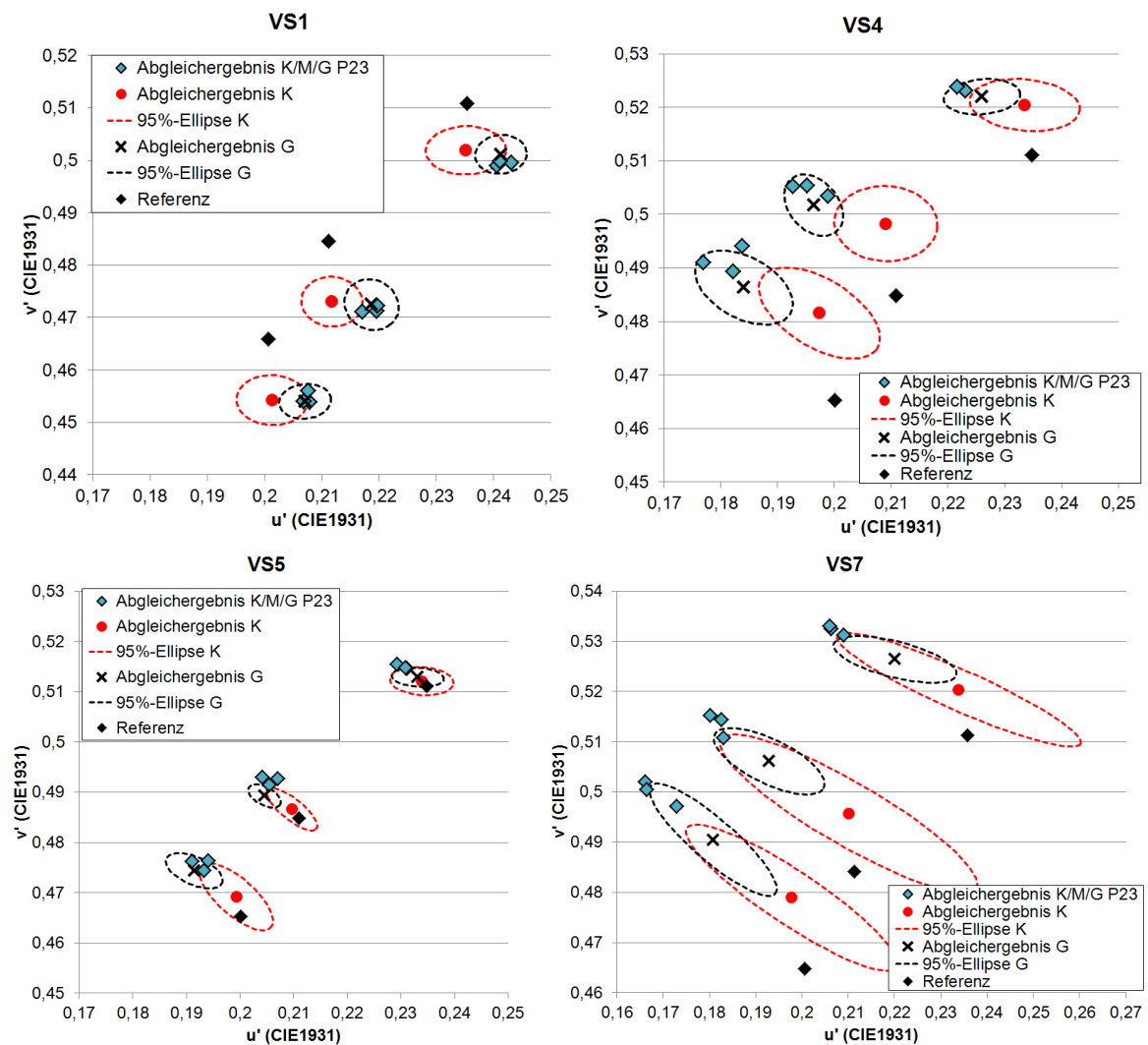


Abbildung 4.14 – Abgleichergebnisse K, M, G der Probandin P23, mit Beobachterfeldgrößen unabhängiger Farbwahrnehmung, im Vergleich zu den Abgleichergebnissen der gesamten Probandengruppe ($n=20$) bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K für die Versuchsszenarien VS1, VS4, VS5 und VS7.

4.1.2.2 Darstellung mit Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964

1964 veröffentlichte die CIE Normspektralwertfunktionen für einen 10° -Standardbeobachter, die bis heute als Standard für die Farbbewertung von Farbreeizen mit einer Beobachterfeldgröße zwischen 4° und 10° gelten [TC-04]. Abbildung 4.15 zeigt die Farbörter der Abgleichergebnisse G und der dazugehörigen Referenzlichtquellen im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1964. Die Farbörter der Referenzlichtquellen sind jetzt nicht mehr identisch, da diese je nach Spektralverteilung von

den Normspektralwertfunktionen von 1964 unterschiedlich bewertet werden. Analog zu den Ergebnissen aus Kapitel 4.1.2.1 schlägt sich die fehlerhafte Farbraumabbildung von visuell gleichen Test- und Referenzspektren auch hier hauptsächlich in einer Farbdifferenz in der v' -Koordinate nieder. Um festzustellen, wie gut unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964 die Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren auf denselben Farbort funktioniert, wird die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{G-\text{Referenz}(CIE1964)}$ ermittelt (vgl. Abbildung 4.9). In Anhang A.6 sind alle Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-\text{Referenz}(CIE1964)}$ für die unterschiedlichen Versuchsszenarien tabelliert. Abbildung 4.16 zeigt, dass die Farbraumfehler deutlich geringere Werte annehmen als unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931. Die maximale Abweichung liegt bei $\Delta u'v'_{G-\text{Referenz}(CIE1964)} = 0,0081$. Entsprechend der Auswertung der Farbraumfehler unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 werden die Versuchsszenarien VS2 und VS5 gut durch die Normspektralwertfunktionen von 1964 abgebildet. Für die anderen Versuchsszenarien liegen die Farbraumfehler zwischen $\Delta u'v'_{G-\text{Referenz}(CIE1964)} = 0,0050$ und $0,0080$ und damit über der Intrabeobachterstreuung ($\Delta u'v' = 0,0020..0,0040$). Beide Normspektralwertfunktionen versagen bei der Abbildung visuell gleicher LED-Spektren auf denselben Farbort. Es gilt sowohl für einen 2°-Standardbe-

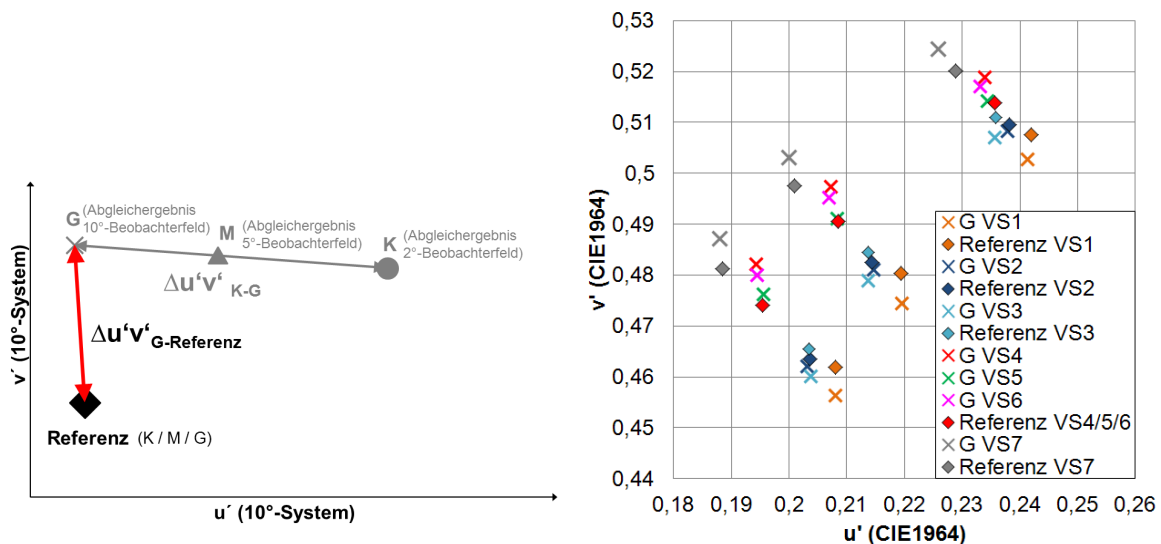


Abbildung 4.15 – Darstellung des Ergebnisschemas der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{G-\text{Referenz}(CIE1964)}$ (links); Farbörter der Mittelwerte ($n=20$) der Abgleichergebnisse G im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1964 (rechts).

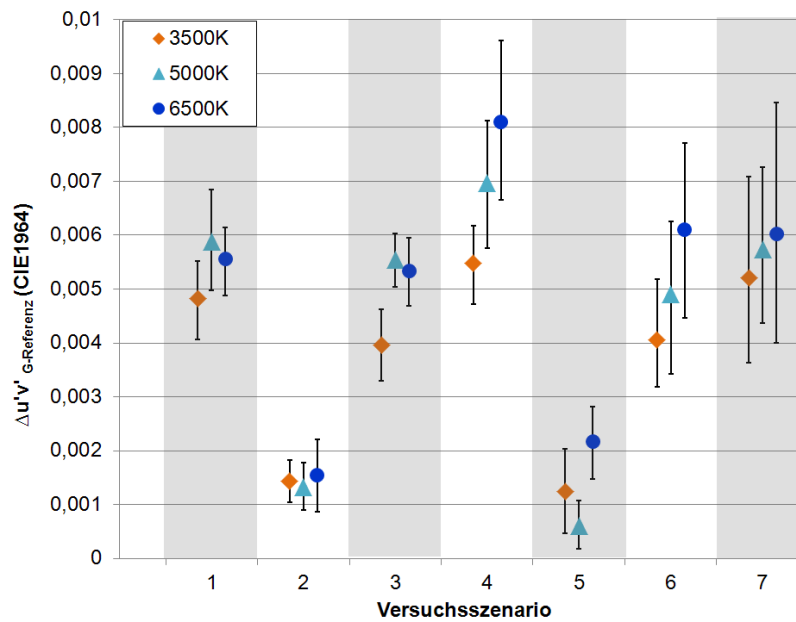


Abbildung 4.16 – Mittelwerte ($n=20$) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1964)}$ und dazugehörige 95%-Konfidenzintervalle für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7.

obachter als auch für einen 10° -Standardbeobachter geeignete Spektralwertfunktionen zu finden, die visuell gleich wahrgenommene LED-Spektren unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung auf denselben Farbart abbilden.

4.1.2.3 Darstellung mit Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE von 2006

Sowohl die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 für einen 2° -Beobachter als auch die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 für einen 10° -Beobachter liefern keine zufriedenstellende Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren auf denselben Farbart. Daher wurden im nächsten Schritt die Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE-Empfehlung CIE170:1-2006 [TC-06] getestet. Diese Funktionen lassen sich für beliebige Beobachterfeldgrößen zwischen 1° und 10° bestimmen. Untersucht werden die abgeleiteten Sehzapfen-Grundfunktionen für ein 2° - und ein 10° -Beobachterfeld entsprechend der für den Abgleich verwendeten Beobachterfeldgrößen für ein mittleres Alter von 30 Jahren. Auf Basis dieser Sehzapfen-Grundfunktionen wurden mittels der Transformationsmatrizen von Stockman und Sharpe die Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{CIE2006-2^\circ/10^\circ}$, $\bar{y}_{CIE2006-2^\circ/10^\circ}$ und $\bar{z}_{CIE2006-2^\circ/10^\circ}$ ermittelt [Sto13]. Mit deren Hilfe können wiederum die Farbkoordinaten der Test- und Referenzlichtquellen in den entsprechenden UCS- $u'v'$ -Farbräumen berechnet werden. Auf die Entwicklung und Ableitung der entsprechenden Funktionen

und die Transformation in Spektralwertfunktionen wird in den Grundlagen in Kapitel 2.3.1 eingegangen. Hier sollen die Ergebnisse unter Verwendung dieser neuen Funktionen beschrieben werden. Außerdem werden die an der

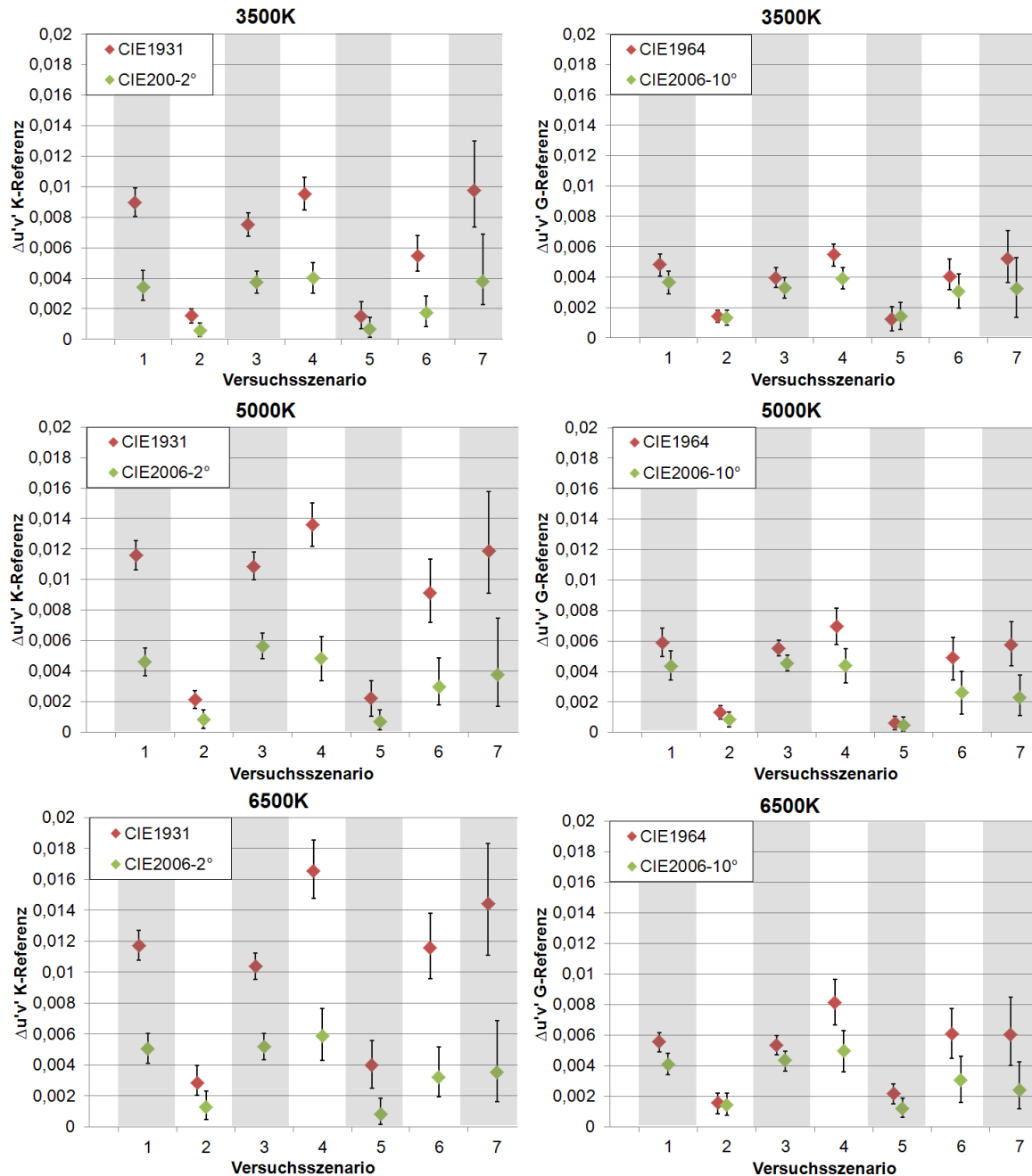


Abbildung 4.17 – Mittelwerte ($n=20$) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)}$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)}$ mit dazugehörigen 95%-Konfidenzintervallen. Vergleich zwischen den Normspektralwertfunktionen von 1931 und den Spektralwertfunktionen, basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen von 2006 für ein 2°-Beobachterfeld (links); Vergleich zwischen den Normspektralwertfunktionen von 1964 und den Spektralwertfunktionen, basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen von 2006 für ein 10°-Beobachterfeld (rechts).

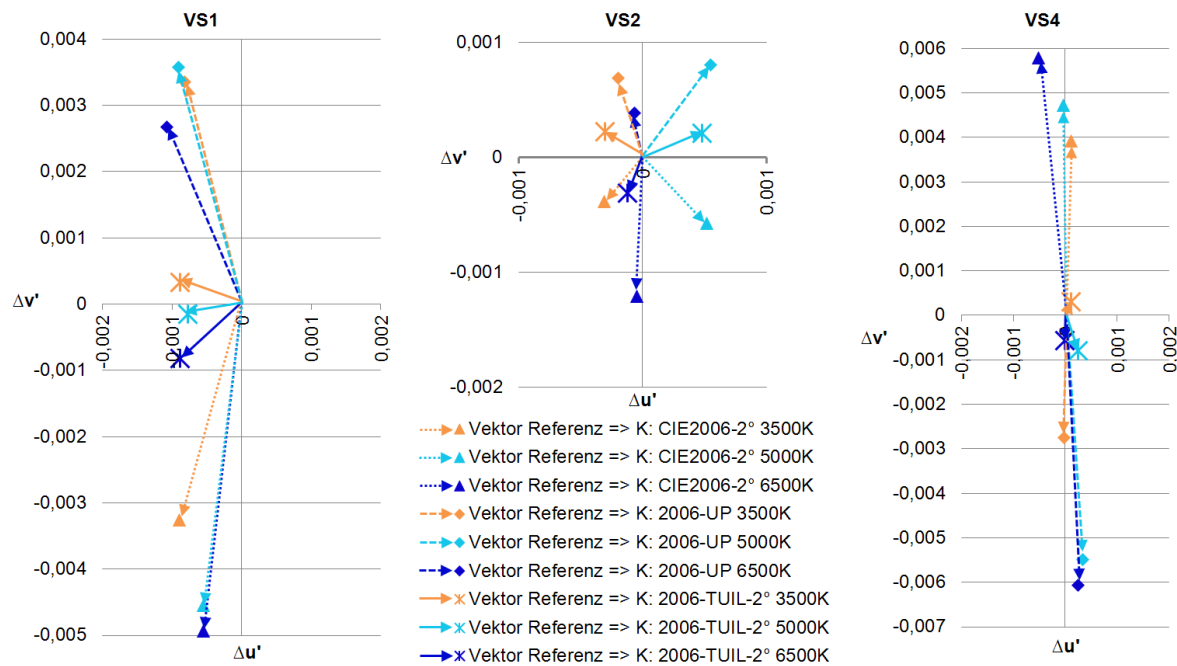


Abbildung 4.18 – Farbortverschiebung zwischen den Farbörtern der Referenzlichtquelle und der visuell dazu gleichen Testlichtquelle unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und der Spektralwertfunktionen der Universität von Pannonia, 2006-UP, für die Versuchsszenarien VS1, VS2 und VS4.

Universität von Pannonia entwickelten Spektralwertfunktionen, im Folgenden als 2006-UP bezeichnet, untersucht. Diese basieren auf einer Modifizierung der Sehzapfen-Grundfunktionen durch eine Verschiebung der S-Zapfen-Empfindlichkeit um 6 nm hin zu kürzeren Wellenlängen. Genauere Ausführungen zu deren Entwicklung sind in Kapitel 2.3.3 zu finden.

In Abbildung 4.17 werden die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)}$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)}$ für die Abbildung der Abgleichergebnisse auf die Farbörter der Referenzlichtquellen mittels der Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° dargestellt. Die Skala wurde bei allen drei Graphen, die den gleichen Farbraumfehler bei unterschiedlichen Farbtemperaturen darstellen, gleich gewählt. Zur Überprüfung, ob von einer signifikanten Verbesserung der Abbildung ausgegangen werden kann, wurden t-Tests nach dem in Kapitel 3.8.1.4 beschriebenen Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse der t-Wert-Berechnungen sind in Anhang A.8 zu finden. Für beinahe alle Abgleichergebnisse kann eine signifikante Verringerung des Farbraumfehlers festgestellt werden. Lediglich bei den beiden Versuchsszenarien VS2 und VS5 ist für die Farbbewertung im 10°-Beobachterfeld keine signifikante Verringerung des Farbraumfehlers nachzuweisen. Bei diesen beiden Versuchsszenarien errei-

chen die Farbraumfehler allerdings bereits unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964 Werte unter $\Delta u'v'_{G-Referenz(1964)} = 0,0030$. Trotz der Verbesserung gegenüber der Verwendung der Normspektralwertfunktionen bleiben für die Farbbewertung im 2°-Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1, VS3, VS4, VS6 und VS7 mittlere Farbraumfehler zwischen $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)} = 0,0040$ und $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)} = 0,0060$ bestehen. Auch für die Beobachtung unter einem 10°-Beobachterwinkel liegt der resultierende Farbraumfehler weiterhin bei mittleren Werten zwischen $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)} = 0,0040$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)} = 0,0060$. Diese Werte liegen im Bereich wahrnehmbarer Farbdifferenzen und über der Intra-beobachterstreuung.

Auch unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-UP, basierend auf den angepassten Sehzapfen-Grundfunktionen der Universität von Pannonia, können die Werte des Farbraumfehlers nicht reduziert werden. Aus Tabelle A.3 im Anhang A.5 ist abzulesen, dass sich die Farbraumfehler im Vergleich zu den Ergebnissen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° für einige Versuchsszenarien verringern, während sie für andere Versuchsszenarien ansteigen. Bei genauerer Betrachtung der Farbdifferenzen stellt sich heraus, dass die fehlerhafte Abbildung im Farbraum durch die modifizierten Sehzapfen-Grundfunktionen überkompensiert werden. In Abbildung 4.18 ist deutlich zu erkennen, dass die Verschiebung der Farbörter der Testlichtspektren zu den Farbörtern der dazugehörigen Referenzspektren unter Verwendung der herkömmlichen Sehzapfen-Grundfunktionen CIE2006-2° und der Pannonischen Sehzapfen-Grundfunktionen 2006-UP in entgegengesetzter Richtung verlaufen. Zudem wird hier verdeutlicht, dass die Verschiebung nahezu ausschließlich die v' -Komponente betrifft. Die v' -Komponente wiederum entspricht am ehesten der blau-gelb Achse der Farbtafel. Die Verschiebung der S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion um 6 nm übersteuert also die Korrektur und überhöht die Empfindlichkeit im kurzwelligen Spektralbereich. Auf diese Ergebnisse stützt sich das kommende Kapitel zur Entwicklung neuer Spektralwertfunktionen.

4.1.2.4 Neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL

Im vorangegangenen Kapitel hat sich gezeigt, dass die neuen Spektralwertfunktionen der Universität von Pannonia die leichte Fehlanpassung in der Blauempfindlichkeit bei den Spektralwertfunktionen CIE2006-2° überkompensieren. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit neue Spektralwertfunktionen entwickelt, die auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE2006 für ein mittleres Alter von 30 Jahren basieren, mit einer um 3 nm hin zu kurzen Wellenlängen verschobenen S-Zapfen-Empfindlichkeit. Mit Hilfe einer Transformationsmatrix werden die Sehzapfen-Grundfunktionen in die Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{2006-TUIL-2^\circ}$, $\bar{y}_{2006-TUIL-2^\circ}$ und $\bar{z}_{2006-TUIL-2^\circ}$ transformiert. Aus diesen lässt sich wiederum ein UCS-u'v'-Farbraum berechnen. Die Randbedingungen für die Ermittlung dieser Matrix sind in Kapitel 2.3.2 dargelegt. Die resultierende Matrix ist in Gleichung 4.1 gegeben:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{y}_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{z}_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,93556 & -1,39194 & 0,35649 \\ 0,68990 & 0,34832 & 0 \\ 0 & 0 & 1,92567 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{l}_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{m}_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ \bar{s}_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{y}_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{z}_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,91920 & -1,32333 & 0,43000 \\ 0,69284 & 0,34968 & 0 \\ 0 & 0 & 2,13728 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{l}_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{m}_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ \bar{s}_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Analog können für das 10°-Beobachterfeld die Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{2006-TUIL-10^\circ}$, $\bar{y}_{2006-TUIL-10^\circ}$ und $\bar{z}_{2006-TUIL-10^\circ}$ mit Hilfe der Transformationsmatrix aus Gleichung 4.2 ermittelt werden. Die hier verwendeten Sehzapfen-Grundfunktionen $\bar{l}_{2006-TUIL-10^\circ}$, $\bar{m}_{2006-TUIL-10^\circ}$ und $\bar{s}_{2006-TUIL-10^\circ}$ entsprechen den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE-Empfehlung CIE170:1-2006 für ein Alter von 30 Jahren und einen Sehwinkel von 10° mit einer um 3 nm hin zu kurzen Wellenlängen verschobenen S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion.

In Abbildung 4.19 sind die neuen Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{2006-TUIL-2^\circ}$, $\bar{y}_{2006-TUIL-2^\circ}$ und $\bar{z}_{2006-TUIL-2^\circ}$ für ein 2°-Beobachterfeld und die Spektralwertfunktionen $\bar{x}_{2006-TUIL-10^\circ}$, $\bar{y}_{2006-TUIL-10^\circ}$ und $\bar{z}_{2006-TUIL-10^\circ}$ für ein 10°-Beob-

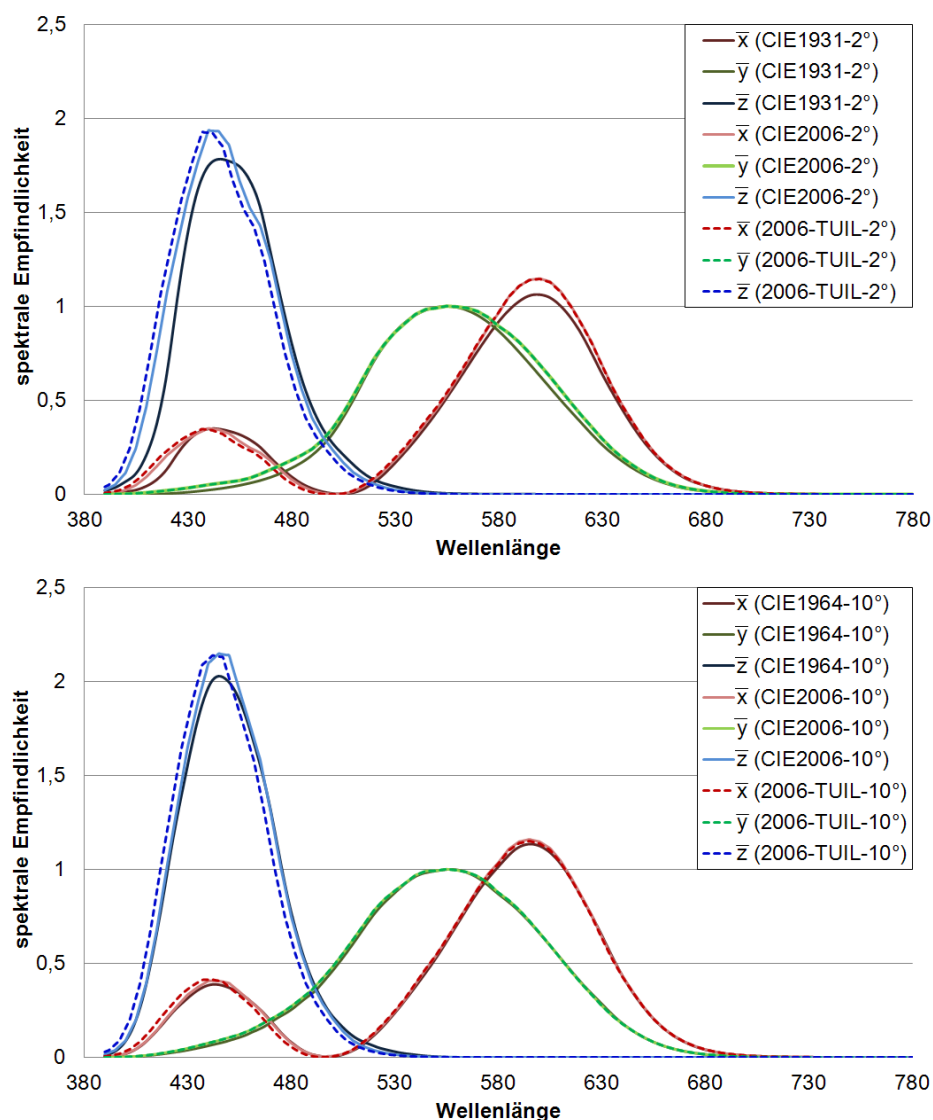


Abbildung 4.19 – Spektralwertfunktionen auf Basis der modifizierten Sehzapfen-Grundfunktionen von 2006, entwickelt an der TU Ilmenau, im Vergleich zu den bestehenden Spektralwertfunktionen der CIE; für einen 2°-Beobachter (oben) und für einen 10°-Beobachter (unten).

achterfeld im Vergleich zu den Normspektralwertfunktionen der CIE und den Spektralwertfunktionen CIE2006 aufgetragen. Bei den Spektralwertfunktionen CIE2006-2° ändern sich gegenüber den Normspektralwertfunktionen CIE1931 alle drei Funktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ deutlich. Während sich die \bar{y} - und \bar{z} -Funktion verbreitern, ist die \bar{x} -Funktion vor allem im Verhältnis zu den anderen Kurven höher. Die Spektralwertfunktionen CIE2006-10° ändern sich kaum gegenüber den Normspektralwertfunktionen CIE1964. Lediglich eine Erhöhung der \bar{z} -Funktion ist zu erkennen. Zwischen den Spektralwertfunktionen CIE2006 und 2006-TUIL liegen Änderungen nur im Wellenlängenbe-

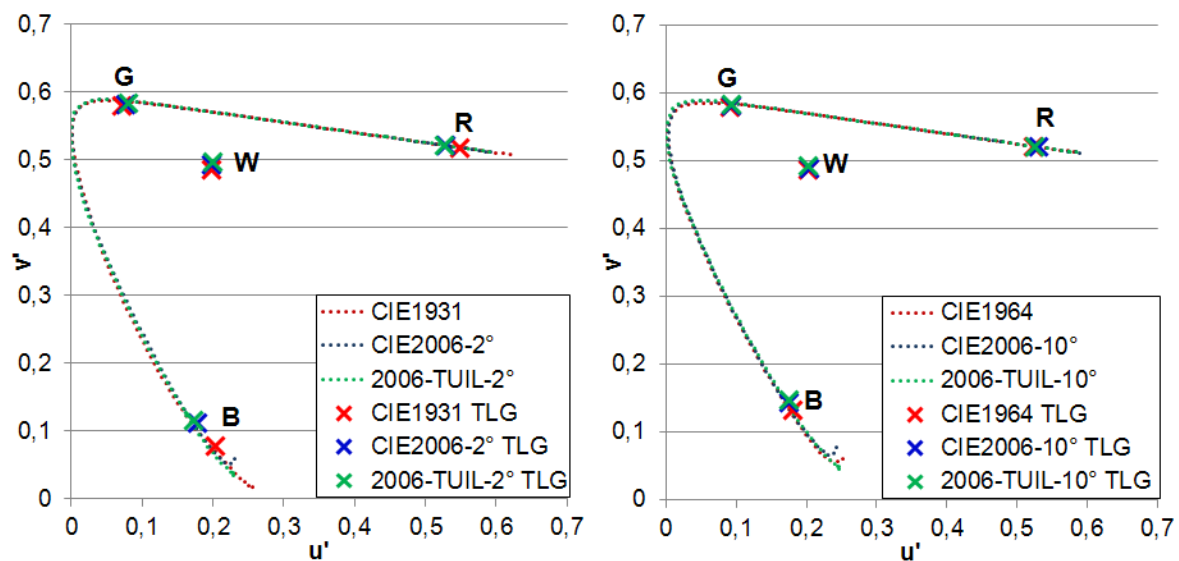


Abbildung 4.20 – Darstellung der Spektralfarbenzüge der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL im Vergleich zu den Spektralfarbenzügen der Normspektralwertfunktionen und Spektralwertfunktionen CIE2006 in der UCS- $u'v'$ -Farbtafel. Zudem sind die mit den unterschiedlichen Spektralwertfunktionen berechneten Farbörter der einzelnen LEDs der Testlichtquelle TLG eingetragen.

reich bis zu 530 nm vor. Die deutlichste Auswirkung der 3 nm verschobenen S-Zapfenempfindlichkeit zeigt sich bei der \bar{z} -Funktion. Die Auswirkungen auf die \bar{x} -Funktion sind gering. Die \bar{y} -Funktion bleibt komplett unverändert. Die $\bar{y}(\lambda)$ -Funktion nach Stockman [Sto13] ist so definiert, dass sie der Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{\text{Sharpe}}(\lambda)$ nach Sharpe [SSJJ11] entspricht. Das bedeutet, die Hellempfindlichkeitsfunktion bleibt unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen bestehen.

In Abbildung 4.20 sind die Spektralfarbenzüge der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL den Spektralfarbenzügen der Normspektralwertfunktionen und der Spektralwertfunktionen CIE2006 gegenübergestellt. Größe und Form des Farbraums ändern sich kaum. Die deutlichste Änderung ist an den Enden des Spektralfarbenzugs zu erkennen. Daher verschieben sich die Farbörter einzelner Spektren beim Wechsel zwischen den unterschiedlichen Farbräumen in den Bereichen der Enden des Spektralfarbenzugs am deutlichsten. In Abbildung 4.21 ist in einzelnen Diagrammen die Verschiebung der Farbörter der verwendeten LED-Grundspektren der Testlichtquelle TLG, durch Verwendung der unterschiedlichen Farbräume für einen 2°-Standardbeobachter, dargestellt. In Tabelle 4.4 sind die Farbörter der einzelnen LEDs der Testlichtquelle TLG in den unterschiedlichen Farbräumen aufgelistet. Am deutlich-

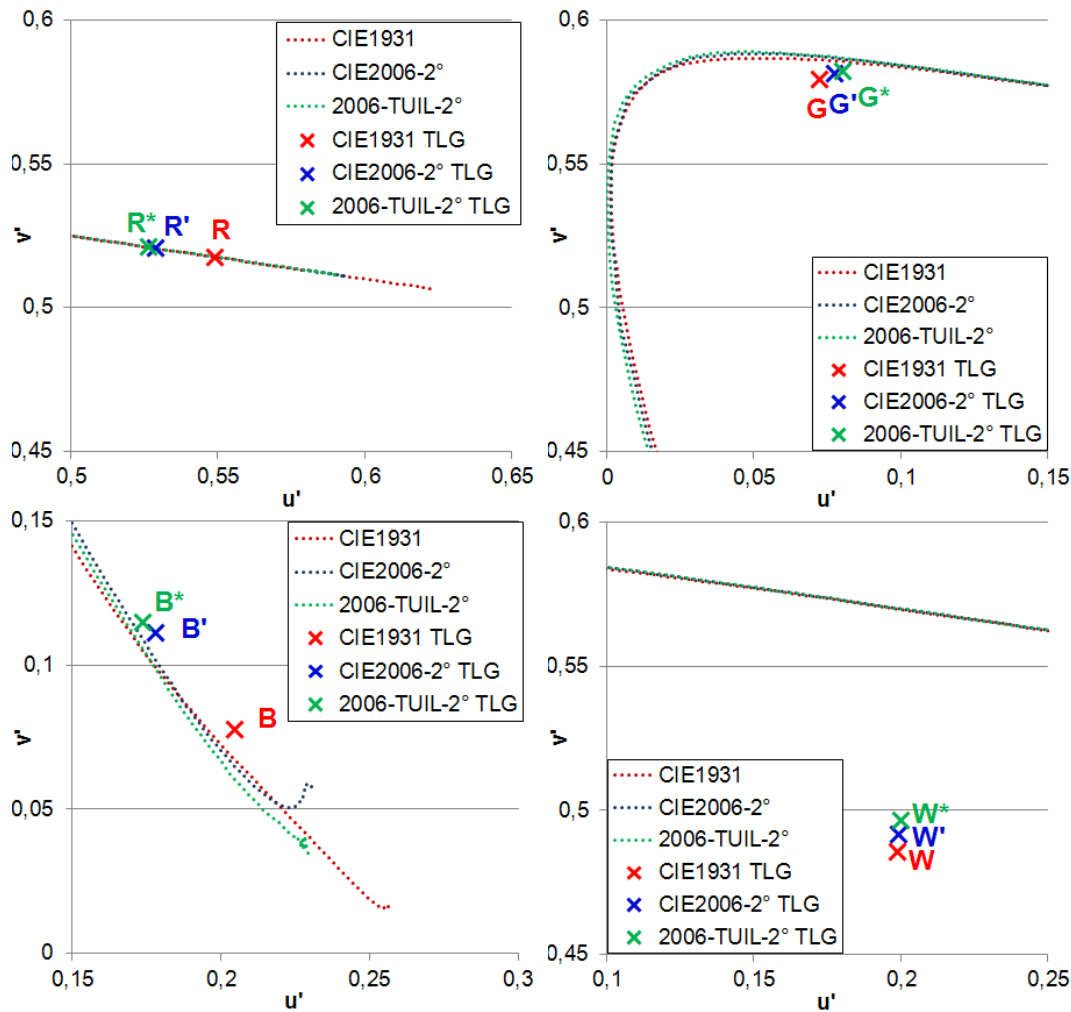


Abbildung 4.21 – Farbörter der LEDs der Testlichtquelle TLG in den unterschiedlichen UCS- $u'v'$ -Farbtafeln für einen 2°-Standardbeobachter.

ten ändern sich die Farbörter, auf welche die blaue und die rote LED abgebildet werden. Während die blaue LED im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen CIE1931 auf den Farbort $u'_B = 0,2046$, $v'_B = 0,0776$ abgebildet wird, liegt der Farbort der blauen LED B^* im Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° bei $u'_{B^*} = 0,1738$, $v'_{B^*} = 0,1149$. Der Farbort der roten LED verschiebt sich von $u'_R = 0,5491$, $v'_R = 0,5176$ im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen CIE1931 auf $u'_{R^*} = 0,5267$, $v'_{R^*} = 0,5210$ unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°.

Um die neuen Spektralwertfunktionen auf ihre Fähigkeit zu testen, visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbort abzubilden, wurden auch hier die Farbdifferenzen zwischen visuell gleich wahrgenommenen Test- und Referenzlichtquellen in den entsprechenden UCS- $u'v'$ -Dia-

Tabelle 4.4 – Farbbörter der LEDs der Testlichtquelle TLG in den verschiedenen Farbräumen basierend auf den unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für 2°- und 10°-Standardbeobachter.

| | Rot | | Grün | | Blau | | Weiß | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | u' | v' | u' | v' | u' | v' | u' | v' |
| CIE1931 | 0,5491 | 0,5176 | 0,0722 | 0,5795 | 0,2046 | 0,0776 | 0,1987 | 0,4857 |
| CIE2006-2° | 0,5288 | 0,5207 | 0,0775 | 0,5813 | 0,1780 | 0,1113 | 0,1992 | 0,4917 |
| 2006-TUILL-2° | 0,5267 | 0,5210 | 0,0804 | 0,5823 | 0,1738 | 0,1149 | 0,1999 | 0,4964 |
| CIE1964 | 0,5241 | 0,5214 | 0,0902 | 0,5795 | 0,1805 | 0,1328 | 0,2032 | 0,4876 |
| CIE2006-10° | 0,5308 | 0,5204 | 0,0920 | 0,5811 | 0,1756 | 0,1426 | 0,2036 | 0,4876 |
| 2006-TUILL-10° | 0,5263 | 0,5211 | 0,0931 | 0,5820 | 0,1751 | 0,1463 | 0,2031 | 0,4931 |

grammen ermittelt. Zum einen wurde berechnet, welche Werte die Farbraumfehler mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p kleiner dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ unterschreiten. Dazu wurden die 95%-Perzentil-Werte der einzelnen Farbdifferenzverteilungen mit Hilfe des Bootstrap-Verfahrens bestimmt. Der Mittelwert des Farbraumfehlers liegt mit 95%iger Wahrscheinlichkeit unter diesem Perzentilwert. Zum anderen wurde mit Hilfe des zuvor beschriebenen t-Test-Verfahrens geprüft, ob die Farbraumfehler gegenüber den bestehenden Farbbewertungssystemen signifikant verringert werden konnten. Die Tabellen mit den Angaben der 95%-Perzentil-Werte sowie der errechneten t-Werte für alle Versuchsszenarien und Farbtemperaturen sind in Anhang A.8 zu finden. Abbildung 4.22 stellt graphisch die Farbraumfehler der neuen Spektralwertfunktionen denen der früheren Bewertungssysteme gegenüber. Mit Hilfe der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-2° können die Farbraumfehler bei der Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren in den Farbraum gegenüber den Normspektralwertfunktionen für alle Versuchsszenarien ausgenommen VS5 signifikant verringert werden. Gegenüber den Spektralwertfunktionen basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen von 2006 kann für das 2°-Beobachterfeld eine signifikante Verringerung der Farbraumfehler für die Versuchsszenarien VS1, VS3 und VS4 erreicht werden. Die Farbraumfehler können für diese Versuchsszenarien im Mittel von ca. $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)} = 0,0056$ auf $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUILL-2^\circ)} = 0,0021$ reduziert werden. Die Farbraumfehler sind mit 95%iger Wahrscheinlichkeit für die Versuchsszenarien VS1 bis VS6 signifikant kleiner als $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUILL-2^\circ)} = 0,0040$. Für 15 dieser 18 Abgleichergebnisse kann der Wert signifikant unter $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUILL-2^\circ)} = 0,0030$ reduziert werden. Dieser Wert entspricht der ermittelten mittleren Intrabeob-

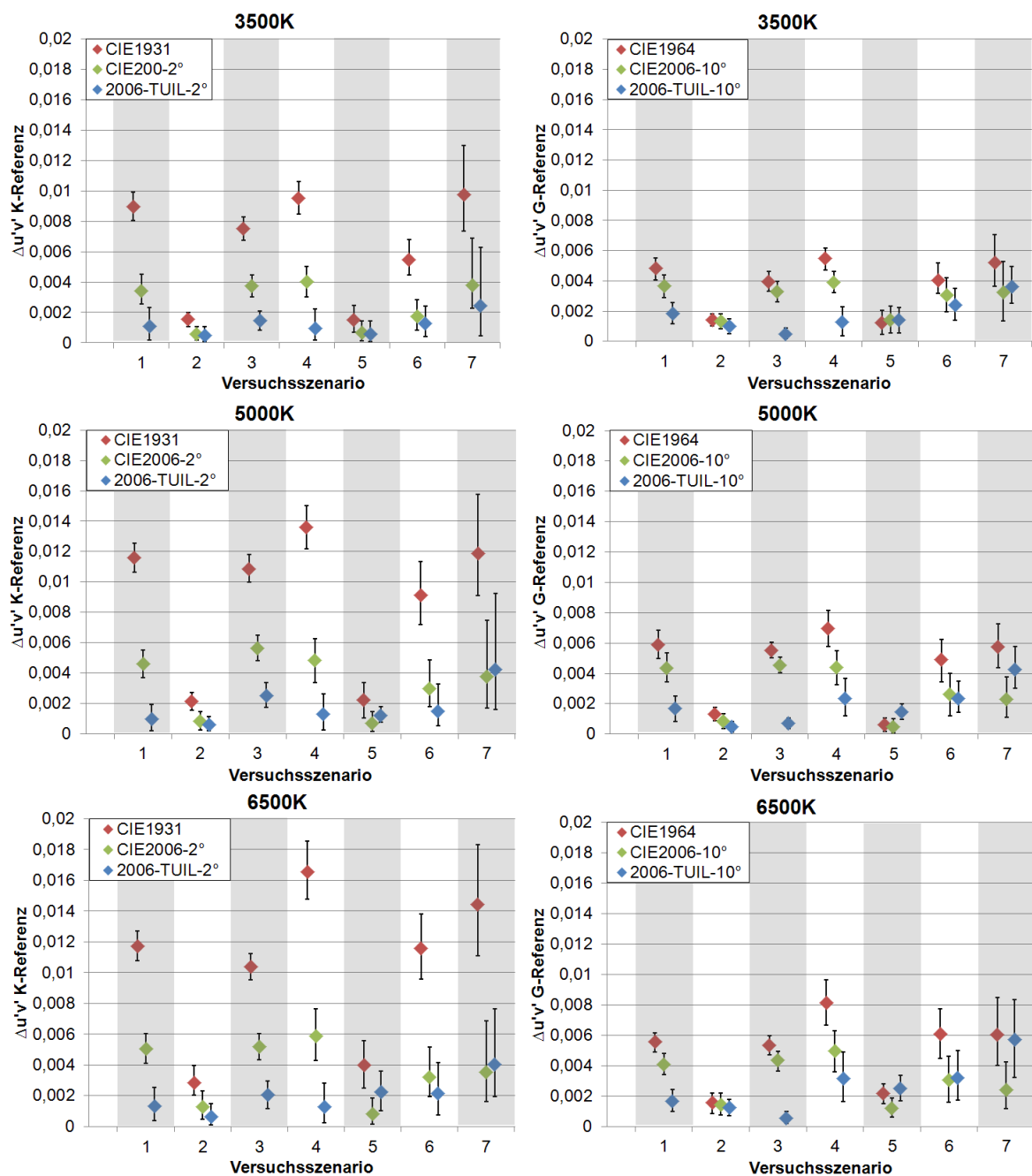


Abbildung 4.22 – Mittelwerte ($n=20$) und 95%-Konfidenzintervalle der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für ein 2°-Beobachterfeld (links) und für ein 10°-Beobachterfeld (rechts).

achterstreuung im 2°-Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1 und VS3. Da Versuchsszenario VS3 bereits die kleinste Interbeobachterstreuung aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Intrabeobachterstreuung für keinen der anderen Versuche kleinere Werte annimmt. Unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° verringern sich die Farb-

raumfehler gegenüber den Normspektralwertfunktionen von 1964 für Versuchsszenario VS1, VS3, VS4 und VS6 signifikant. Analog zu den Auswertungen der Farbdifferenzen aus dem 2°-Beobachterfeld sind die Farbraumfehler unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964 für die Versuchsszenarien VS2 und VS5 bereits sehr klein ($\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1964)} = 0,0020$), sodass bei diesen Versuchsszenarien keine signifikante Verbesserung erreicht werden kann. Gegenüber den Spektralwertfunktionen CIE2006-10° verringern sich vor allem für die Versuchsszenarien VS1 und VS3 die Farbraumfehler. Unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-10° können die Farbraumfehler der Versuchsszenarien VS2 und VS3 mit 95%iger Wahrscheinlichkeit signifikant auf Werte unter $\Delta u'v'_{G-Referenz(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0020$ reduziert werden. Für das Versuchsszenario VS1 nehmen alle Farbraumfehler Werte an, die signifikant kleiner als $\Delta u'v'_{G-Referenz(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0030$ sind. Insgesamt lassen sich die Farbraumfehler für 16 der 18 Abgleichergebnisse der Versuchsszenarien VS1 bis VS6 auf Werte unter $\Delta u'v'_{G-Referenz(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0040$ reduzieren. Die Farbraumfehler der Versuchsszenarien VS4 und VS6 bei 6500 K und des Versuchsszenarios VS7 erreichen Werte über 0,0040.

4.1.3 Weitere Einflussfaktoren

Bei den Abgleichuntersuchungen ergaben sich weitere Ergebnisse, die nicht direkt zur Untersuchung der Abbildung visuell gleicher Spektren in den Farbraum beitragen. Diese sollen hier doch erwähnt werden, um deren potentiellen Einfluss auf die Abgleichergebnisse diskutieren zu können.

4.1.3.1 Einfluss der Helligkeit

Vergleicht man die beiden Diagramme aus Abbildung 4.23, wird deutlich, dass die Probanden bei VS2, VS4, VS5, VS6 und VS7 dazu neigen, auf der Testfläche deutlich höhere Leuchtdichtewerte einzustellen. Bei diesen Versuchsszenarien nahmen alle Probanden die Referenzfläche als deutlich grünlich war. Bei Versuch VS1 und VS3 liegen die durch die Probanden eingestellten Leuchtdichten auf der Testfläche nahe an den Leuchtdichtewerten der Referenzlichtquelle. Dies weist darauf hin, dass auch die photopische Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ der CIE1924 bei der Bewertung der Helligkeitsempfindung von

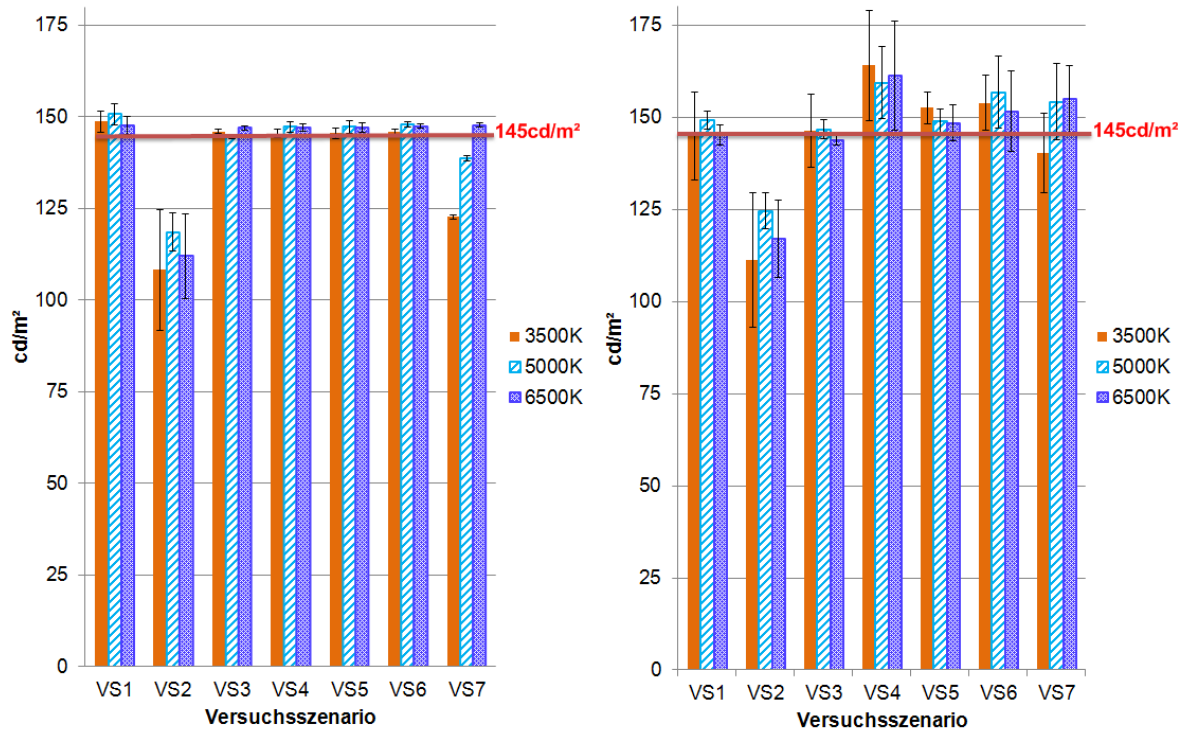


Abbildung 4.23 – Leuchtdichte der Referenzfläche für Versuchsszenarien VS1 bis VS7 für die untersuchten Farborteinstellungen bei Farbtemperaturen von 3500 K, 5000 K und 6500 K. Die eingetragenen Unsicherheiten stellen die Standardabweichung der Leuchtdichteniveaus der Referenzfläche für die Sessions aller 20 Probanden dar (links). Werte der von den Probanden eingestellten Leuchtdichteniveaus der Testfläche für Versuchsszenarien VS1 bis VS7 für die Abgleichuntersuchungen bei 3500 K, 5000 K und 6500 K (rechts).

LED-Lichtquellen mit unterschiedlicher spektraler Verteilung für bestimmte Versuchsszenarien versagt. Stockman und Sharpe beschreiben, dass die Helligkeitswahrnehmung stark in Abhängigkeit der chromatischen Adaptation variiert, da der Beitrag der einzelnen Zapfenarten unterschiedlich ist [SSJJ05]. Stockman und Sharpe [SSJJ05] [SSJJ11] entwickelten daraufhin eine neue $V_{Sharpe}(\lambda)$ -Funktion, die in den folgenden Versuchen, bei denen keine Helligkeitsanpassung durch den Probanden erfolgt, verwendet werden. Da die Untersuchungen aus Abschnitt 4.1.2.1.2 ergeben haben, dass die Leuchtdichte der Untersuchungsflächen keinen Einfluss auf die Abgleichergebnisse nimmt, wird auf die Leuchtdichtewerte hier nicht weiter eingegangen. Ausschlaggebend für die Untersuchungen war, dass die Probanden die Leuchtdichte so anpassen konnten, dass sie keinen Helligkeitsunterschied zwischen den beiden Testflächen wahrnehmen.

4.1.3.2 Scheinbare Inhomogenität der Bewertungsfläche

Bei den Untersuchungen beschrieb die Mehrheit der Probanden Probleme bei den Farbabgleichen bei den Versuchsszenarien VS4, VS6 und vor allem bei VS7. Die Probanden nahmen die beiden Testflächen bei der Betrachtung im 5°- und 10°-Beobachterfeld deutlich farblich inhomogen wahr und waren deshalb bei ihren Farbabgleichen leicht verunsichert. Sie beschrieben farbige Flecken in der Mitte der Abgleichflächen, an der Kante hin zu der anderen Testfläche. Die Farbflecken nahmen jeweils die Gegenfarbe der farblichen Färbung der Testfläche an und schienen sich bei Augenbewegungen leicht mit zu bewegen. Wirkte die eine Testfläche leicht rötlich, stellte sich der Farbfleck grünlich dar, während sich auf der anderen Testfläche ein entgegengesetztes Bild ergab. Auch nachdem die beiden Testflächen, unter bewusster Missachtung der Flecken, farblich visuell angepasst wurden, blieben die Flecken erhalten. Abbildung 4.24 zeigt schematisch eine Darstellung des sich ergebenden visuellen Farbeindrucks, wie er von den Probanden beschrieben wurde. Diese Beobachtungen stimmen mit Beschreibungen der Auswirkungen des Maxwell Spots überein, die bei den Farbabgleichen zur Bestimmung der 10°-Normspektralwertfunktionen beschrieben wurden [WS00] (S.133). Der Maxwell Spot ist auf die größere Schichtdicke der macula lutea im Bereich der Fovea zurückzuführen. Die Probanden wurden angehalten, die Farbflecken zu ignorieren und den Farbabgleich auf die Restfläche, ohne den Farbfleck, zu beziehen. Trotz

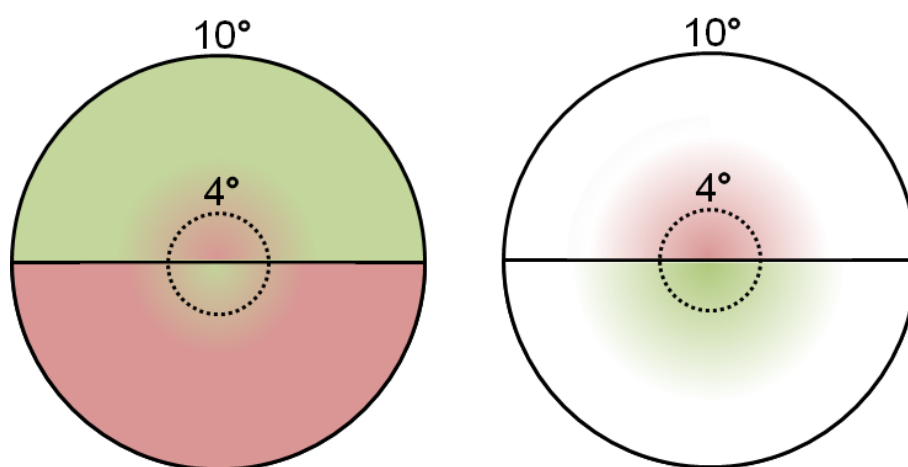


Abbildung 4.24 – Schematische Darstellung der wahrgenommenen Inhomogenitäten der Testfelder bei starken Spektraldifferenzen der zu vergleichenden Testspektren zu Beginn des Abgleichversuchs (links) und nach beendetem Abgleich (rechts).

der empfundenen Unsicherheit der Probanden bei den Abgleichen, ergaben sich für die meisten Versuchsszenarien keine größeren Intrabeobachterstreuungen für die Abgleiche im 10°-Beobachterfeld gegenüber den Abgleichen im 2°-Beobachterfeld.

4.1.3.3 Einfluss des Ortes der Referenzlichtquelle

Untersuchungen von Fotios [FHC08] haben gezeigt, dass verschiedene Bias-Effekte die Ergebnisse von Wahrnehmungsuntersuchungen beeinflussen können. Einer dieser Effekte besteht darin, dass der Proband allein aufgrund der Position eines Reizes diesen anders bewertet. Daher stellt sich die Frage, inwiefern die Darstellung der Referenzlichtquelle im oberen Bereich die Ergebnisse der Untersuchungen zur Farbwahrnehmung beeinflusst. Ein Wechsel der Referenz- und der Testlichtquelle während der Versuchsreihe wäre nicht praktikabel gewesen, da sich die stabilen Versuchsbedingungen hätten ändern können. Daher wurde nach Beendigung der gesamten ersten Versuchsreihe eine neue Versuchsreihe durchgeführt, um den Einfluss der Lage von Referenz- und Testlichtquelle auf die Ergebnisse der Abgleichversuche zu untersuchen.

4.1.3.3.1 Versuchsszenarien und Probanden

Der Versuchsaufbau für diese Untersuchungen ist Kapitel 3.2 zu entnehmen. Lediglich die hinteren Mischkammern von Box1 und Box2 wurden für diese Versuche ausgetauscht. Die Versuchsbedingungen entsprechen denen der vorangegangenen Untersuchungen. 12 der 20 Probanden (6 Frauen und 6 Männer) absolvierten vier der Versuchsszenarien ein zweites Mal. Die wiederholten Versuchsszenarien beinhalteten VS1, VS4, VS5 und VS7. Die Auswahl fiel auf Versuchsszenarien VS1, VS4 und VS5, da diese RGBW-LED-Mischungen beinhalten. VS7 wurde in die Auswahl aufgenommen, da sich bei diesem Versuchsszenario die größten Änderungen durch die Beobachterfeldgrößenänderung ergaben und daher die Annahme nahe lag, dass bei diesem Versuchsszenario auch der Einfluss der veränderten Referenzlichtposition am deutlichsten hervortreten würde.

4.1.3.3.2 Ergebnisse

Es gilt herauszufinden, ob sich die Abgleichergebnisse ändern, wenn die

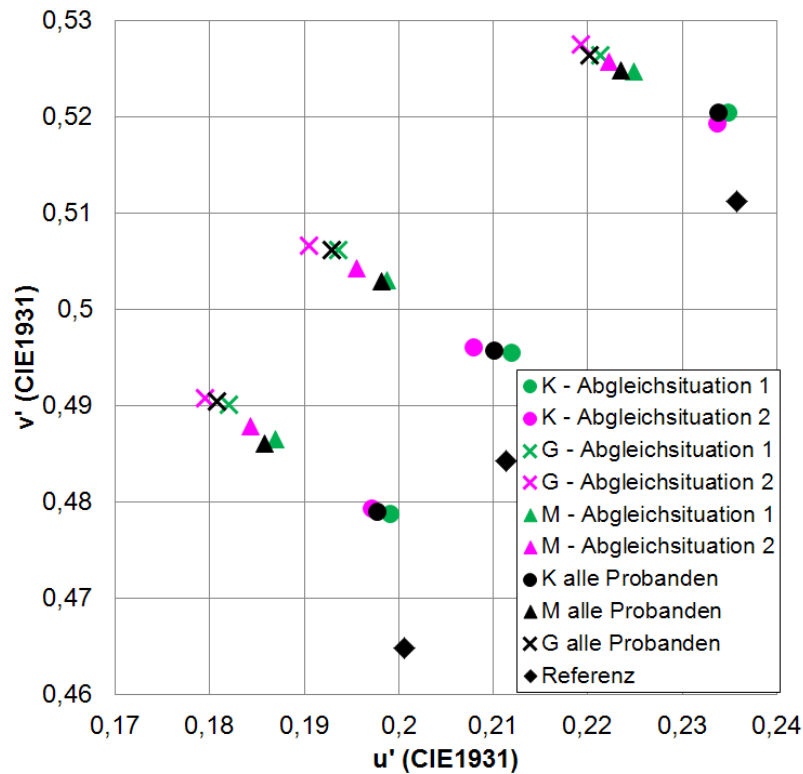


Abbildung 4.25 – Farbörter der Abgleichergebnisse für Versuchsszenario VS7 für Abgleichsituation 1 (Referenzlichtquelle im oberem Testfeld) und Abgleichsituation 2 (Referenz im unteren Testfeld).

Referenzlichtquelle statt im oberen Testfeld nun im unteren Testfeld dargeboten wird. Zu diesem Zweck wird das Boot-Strap-Verfahren angewandt, um die Farbdifferenz zwischen den Abgleichergebnissen mit der Referenzlichtquelle im oberen Testfeld (Abgleichsituation 1) und den Abgleichergebnissen mit der Referenzlichtquelle im unteren Testlichtfeld (Abgleichsituation 2) zu ermitteln. Die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K/G(Ref\ oben)-K/G(Ref\ unten)}$ beschreibt den Farbabstand zwischen den Mittelwerten der Abgleichergebnisse aller 12 Probanden mit der Referenzlichtquelle oben und der Referenzlichtquelle unten. In Abbildung 4.25 sind die Farbörter der Abgleichergebnisse aus Abgleichsituation 1 und 2 für die Beobachterfeldgrößen 2° , 5° und 10° für Versuchsszenario VS7 eingetragen. In Tabelle 4.5 sind die Mittelwerte der Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K/G(Ref\ oben)-K/G(Ref\ unten)}$ und die dazugehörigen 1,96fachen Standardfehler $\hat{\sigma}$ für alle vier untersuchten Versuchsszenarien abzulesen. Die Farbortverschiebung, bedingt durch die Änderung des Darstellungsortes der Referenzlichtquelle, ist für Versuchsszenario VS1, VS4 und VS5 kleiner als $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)} = 0,0022$. Dies liegt im Bereich

Tabelle 4.5 – Mittelwerte ($n=20$) der Farbabstände $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)}$, ermittelt mit Hilfe des Boot-Strap-Verfahrens, und dazugehörige 1,96fache Standardfehler $\hat{\sigma}$ für die Versuchsszenarien VS1, VS4, VS5 und VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K.

| Versuchsszenario | VS1 | VS4 | VS5 | VS7 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 3500 K | | | | |
| $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)}$ | 0,0010 | 0,0015 | 0,0011 | 0,0024 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)})$ | 0,0010 | 0,0014 | 0,0010 | 0,0022 |
| $\Delta u'v'_{G(Ref\ oben)-G(Ref\ unten)}$ | 0,0008 | 0,0017 | 0,0011 | 0,0025 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(\Delta u'v'_{G(Ref\ oben)-G(Ref\ unten)})$ | 0,0006 | 0,0013 | 0,0006 | 0,0027 |
| 5000 K | | | | |
| $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)}$ | 0,0022 | 0,0013 | 0,0013 | 0,0046 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)})$ | 0,0021 | 0,0016 | 0,0012 | 0,0041 |
| $\Delta u'v'_{G(Ref\ oben)-G(Ref\ unten)}$ | 0,0011 | 0,0016 | 0,0011 | 0,0032 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(\Delta u'v'_{G(Ref\ oben)-G(Ref\ unten)})$ | 0,0011 | 0,0015 | 0,0006 | 0,0027 |
| 6500 K | | | | |
| $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)}$ | 0,0013 | 0,0016 | 0,0019 | 0,0028 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)})$ | 0,0016 | 0,0018 | 0,0010 | 0,0034 |
| $\Delta u'v'_{G(Ref\ oben)-G(Ref\ unten)}$ | 0,0012 | 0,0020 | 0,0011 | 0,0032 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(\Delta u'v'_{G(Ref\ oben)-G(Ref\ unten)})$ | 0,0011 | 0,0019 | 0,0006 | 0,0031 |

der für diese Versuchsszenarien ermittelten Intrabeobachterunsicherheit. Die Abgleichergebnisse für Versuchsszenario VS7 ändern sich im Schnitt um ca. $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)} = 0,0030$. Dies liegt in derselben Größenordnung, wie die für Versuchsszenario VS7 ermittelte Intrabeobachterstreuung. Der Einfluss der Darstellungsposition des Referenz- und Testfeldes hatte demnach keinen nachweisbar signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Abgleichtests.

4.1.4 Diskussion der Ergebnisse der Side-by-Side Abgleichversuche

Die Ergebnisse der Abgleichtests bei unterschiedlichen Farbtemperaturen und Vergleichen unterschiedlichster LED-Zusammensetzungen sollten Aufschluss darüber geben, wie gut die Farbwahrnehmung der untersuchten Probandengruppe mit Hilfe der Normspektralwertfunktionen CIE1931 modelliert werden kann. Zu diesem Zweck wurden die Farbdifferenzen zwischen visuell gleich wahrgenommenen Testspektren und Referenzspektren ausgewertet. Es bestätigte sich die Hypothese, dass die Farbdifferenzen bzw. Farbraumfehler stark abhängig von der spektralen Zusammensetzung der

untersuchten LED-Spektren sind. Die größten Farbraumfehler ergaben sich bei den Vergleichsspektren mit deutlichen Spektralunterschieden im Bereich kurzer Wellenlängen. Die Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren schlugen sich besonders stark in der v' -Koordinate nieder. Abhängig von den verwendeten Test- und Referenzlichtspektren nahmen die Farbraumfehler, unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931, für Abgleichversuche in einem 2° -Beobachterfeld, Werte zwischen $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0010$ und $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0165$ an. Die mittleren Farbraumfehler unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 lagen für fünf der sieben Versuchsszenarien bei ca. $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0100$. Damit konnte gezeigt werden, dass sich die Normspektralwertfunktionen von 1931 für eine Abbildung visuell gleich wahrgenommener LED-Spektren auf denselben Farbort nicht eignen. Ähnliche Ergebnisse stellte Csuti [CS08] 2008 bei Untersuchungen zur Farbwahrnehmung von LED-Lichtquellen im Vergleich zu herkömmlichen Temperaturstrahlern fest. In Untersuchungen in einem 2° -Beobachterfeld ermittelte er Farbdifferenzen zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren von bis zu ca. $\Delta u'v' = 0,0300$, die auch bei diesen Versuchen deutlich in der v' -Richtung ausgeprägt waren. Untersuchungen von Schanda und Csuti [CSP⁺11] lieferten für Vergleiche unterschiedlicher LED-Spektren Farbraumfehler von $\Delta u'v' = 0,0070$.

Werden die Normspektralwertfunktionen von 1931 genutzt, um die Farbwahrnehmung in einem 10° -Beobachterfeld zu bewerten, nehmen die Farbraumfehler Werte bis zu $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)} = 0,0323$ an. Die Farbverschiebung bedingt durch eine Änderung der Beobachterfeldgröße liegen in derselben Größenordnung wie die Farbraumfehler bedingt durch eine Verwendung fehlerhafter Spektralwertfunktionen. Die Farbraumfehler erreichen maximale Werte von $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)} = 0,0165$, während die maximale Farbdifferenz bedingt durch eine Änderung der Beobachterfeldgröße einen Wert von $\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)} = 0,0202$ aufweist. Zum einen ist es also notwendig Spektralwertfunktionen zu finden, welche die Farbwahrnehmung auch für engbandige Spektren wahrnehmungsgemäß modellieren. Zum anderen ist es essenziell die korrekte Beobachterfeldgröße zu berücksichtigen.

Im weiteren Vorgehen wurde nach Spektralwertfunktionen gesucht, mit denen es möglich ist, visuelle Farbgleichheit von Vergleichsspektren zu bestim-

men. Es ist bekannt, dass die Beobachterfeldgröße Einfluss auf die Farbwahrnehmung nimmt [WS00] (S. 373). Diese Aussage konnte in den durchgeführten Abgleichuntersuchungen bestätigt werden. Da der Einfluss der Beobachterfeldgröße bei einem Wechsel von einem 2°- zu einem 10°-Beobachterfeld nicht zu vernachlässigen ist, kann auch kein Satz Spektralwertfunktionen die Farbwahrnehmung für beide Beobachterfeldgrößen zugleich zufriedenstellend modellieren. Daher wurden jeweils Spektralwertfunktionen für einen 2°- und für einen 10°-Beobachter untersucht. Die sich ergebenden Farbraumfehler unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen wurden analysiert. Zum Einsatz kamen die Normspektralwertfunktionen von 1964 für einen 10°-Standardbeobachter, die Spektralwertfunktionen basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE2006 für einen 2°- und einen 10°-Beobachter und die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL für einen 2°- und einen 10°-Beobachter. Als Ergebnis aller Untersuchungen stellte sich heraus, dass die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL, sowohl für den 2°-Beobachter als auch für den 10°-Beobachter, visuell gleich wahrgenommene Spektren am besten auf denselben Farbort abbilden. Die Farbraumfehler für die Abgleichversuche im 2°-Beobachterfeld konnten für die Versuchsszenarien VS1 bis VS6 mit 95%iger Sicherheit auf Werte unter $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)} = 0,0040$ reduziert werden. Für die Abgleiche im 10°-Beobachterfeld können die Farbraumfehler für 16 der 18 Abgleichergebnisse der Versuchsszenarien VS1 bis VS6 auf Werte kleiner $\Delta u'v'_{G-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)} = 0,0040$ reduziert werden. Die Verbesserungen gegenüber den Spektralwertfunktionen der CIE2006 sind für mindestens drei der Versuchsszenarien signifikant. Allerdings bleibt die Frage bestehen, ob diese Verringerungen des Farbabstandes in der visuellen Beurteilung der Farbdifferenzen auch praktisch relevant sind. Um dies herauszufinden wurden visuelle Farbdifferenzbewertungen durchgeführt, die in Kapitel 4.2 vorgestellt werden.

Die neuen Spektralwertfunktionen basieren auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE-Empfehlung von 2006 mit einer Verschiebung der S-Zapfempfindlichkeit um 3 nm hin zu niedrigeren Wellenlängen. Die Begründung für eine Verschiebung der S-Zapfen-Grundfunktion für die Entwicklung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL ergibt sich aus der empirischen Datenanalyse. Die physiologische Erklärung dafür, warum eine Verschiebung

der S-Zapfen-Grundfunktion um 3 nm hin zu niedrigeren Wellenlängen zu deutlich geringeren Farbraumfehlern führt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht zufriedenstellend erkundet werden. Die Peakwellenlänge der neuen S-Zapfen-Grundfunktion liegt bei 440 nm und stimmt damit mit den 1975 von Smith und Pokorny und 1979 von Estevez ermittelten Peakwellenlängen der S-Zapfenempfindlichkeiten für die Bewertung spektraler Informationen auf der Ebene der Cornea überein ([Hun95] (S.38). Weitere Werte für die Maxima der S-Zapfenempfindlichkeit auf Zapfenebene werden von Dartnall mit $\lambda = (419 \pm 3,6) \text{ nm}$ [Sch07] (S.221) angegeben. Selbst in den Untersuchungen von Stockman und Sharpe lag die Variation der Peakwellenlängen im blauen Bereich bei ca. $\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$ [SSF99]. Zudem führen die beiden von Stockman und Sharpe beschriebenen Rechenmethoden für die Anpassung der Funktionen an die Datensätze visuell gleich wahrgenommener Spektren zu einer um $\Delta\lambda = 2,7 \text{ nm}$ verschobenen S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion [SS00]. Damit steht die neue S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion nicht im Widerspruch zu den bisherigen Forschungsergebnissen zur spektralen Empfindlichkeit der S-Zapfen.

Die Untersuchungen zur Intrabeobachterstreuung dienten dazu, herauszufinden, welche Farbdifferenzen als Wahrnehmungsschwelle definiert werden können. Dabei stellte sich heraus, dass auch die Intrabeobachterstreuung von den verglichenen LED-Spektren abhängig ist. Für die Vergleiche verschiedener RGBW-Spektren bei den Versuchsszenarien VS1 und VS3 ergaben sich für die Abgleiche im 2°-Beobachterfeld Unsicherheiten im Wertebereich von $\Delta u'v' = 0,0030$. Im 10°-Beobachterfeld lagen die Unsicherheiten bei ca. $\Delta u'v' = 0,0020$. Die Tatsache, dass die Intrabeobachterstreuung im großen Abgleichfeld geringer ausfällt als im 2°-Beobachterfeld passt zu den Ergebnissen aus Untersuchungen von Brown [Bro57]. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nicht für die Intrabeobachterstreuung bei Versuchsszenario VS7. Die mittlere Unsicherheit der Abgleiche im 2°-Beobachterfeld von ca. $\Delta u'v' = 0,0040$ steht hier einer Unsicherheit im 10°-Beobachterfeld von ca. $\Delta u'v' = 0,0050$ gegenüber. Diese erhöhte Unsicherheit bei den Abgleichen im großen Beobachterfeld lässt sich mit der in Kapitel 4.1.3.2 beschriebenen scheinbaren Inhomogenität der Testfelder bei Versuchsszenarien mit besonders stark variierenden Spektren erklären. Die Ermittlung der MacAdam-Ellipsen nach MacAdam [Mac42], welche die kleinste wahrnehmbare Farbdif-

ferenz an einem bestimmten Farbort beschreiben, basiert auf demselben Prinzip der Erfassung der Intrabeobachterstreuung durch mehrfache Abgleiche an demselben Farbort. Allerdings wird eine MacAdam-Ellipse auf Basis der Standardabweichung des Ergebnisdatenclusters ermittelt. Die hier verwendeten Wahrnehmungsschwellen basieren dagegen auf der Auswertung der 95%-Ellipsen. Dies stimmt überein mit der Ermittlung der Farbschwellen-Ellipsen nach Wyszecki [WF71]. Die Wahrnehmungsschwellen nach MacAdam, Brown und Wyszecki, liegen in der gleichen Größenordnung, mit Ellipsen-Achsen zwischen $\Delta u'v' = 0,0010$ und $\Delta u'v' = 0,0040$, wie die in den experimentellen Untersuchungen ermittelten Intrabeobachterstreuerungen. Die ermittelten Intrabeobachterstreuerungen für Versuchsszenario VS7 liegen deutlich über diesen Werten. Die besonders ausgeprägten Differenzen zwischen den Vergleichsspektren führen zu Intrabeobachterstreuerungen bis zu $\Delta u'v' = 0,0070$.

Aufgrund der unterschiedlichen Farbwahrnehmung zwischen Individuen ergeben sich Interbeobachterstreuerungen, die deutlich über den Werten der Intrabeobachterstreuerungen liegen. Die Interbeobachterstreuung ist stark abhängig von den verwendeten Vergleichsspektren. Die Einflussfaktoren, die die individuellen Unterschiede in der Farbwahrnehmung zwischen verschiedenen Beobachtern hervorrufen, sind die Linse und die Schicht des Makulapigments, die in ihrer Schichtdicke und Dichte variieren. Außerdem unterscheidet sich die axiale optische Dichte des Photopigments im äußeren Segment der Rezeptoren von Individuum zu Individuum. Eine höhere Dichte des Photopigments bedingt eine Verflachung der spektralen Zapfen-Empfindlichkeitskurve [SS99] (S.54). Abhängig von den Wellenlängenbereichen, in denen das Makulapigment und die Linsenvergilbung die Farbwahrnehmung beeinflussen, variieren die Abgleichergebnisse besonders bei den Spektralvergleichen, die deutliche Unterschiede in diesen Wellenlängenbereichen aufweisen. Die Interbeobachterstreuung ist daher für alle Versuchsszenarien bei den Abgleichen mit hohen Farbtemperaturen am größten. Außerdem ist die Interbeobachterstreuung bei den Versuchsszenarien VS4 bis VS7, mit den ausgeprägtesten Spektraldifferenzen, besonders groß. Die Achsenabschnitte der 95%-Streuungsellipsen erreichen maximale Werte von $\Delta u'v' = 0,0300$. Bei allen Versuchsszenarien mit deutlichem Beobachterfeldgrößeneinfluss ist die Streuerung in derselben Richtung wie die Farbortverschiebung bedingt durch

den Einfluss der Beobachterfeldgröße besonders stark ausgeprägt (vergleiche Abbildung 4.11, Versuchsszenarien VS4 bis VS7).

Bei den Abgleichen im großen Beobachterfeld kam es bei Versuchsszenarien mit besonders unterschiedlichen Spektren zu einem inhomogenen Farbeindruck der Bewertungsfläche. Diese scheinbare Inhomogenität, trotz gleich bleibender Spektralzusammensetzung, ist auf den sogenannten Maxwell-Spot zurückzuführen. Ähnliche Effekte ergaben sich bereits bei den Maximum-Saturation-Abgleichen zur Ermittlung der Spektralwertfunktionen im 10°-Beobachterfeld zwischen 1955 und 1959. Der Maxwell-Spot wird in der Literatur meist so beschrieben, dass bei der Betrachtung einer Farbmischung aus einem schmalbandigen roten und blauen Spektrum, ein roter Punkt im Bereich des zentralen Gesichtsfeldes wahrgenommen wird [Sch07] (S.10). Dieses Phänomen konnte auch in der Praxis unter lila- bis magentafarbener LED-Beleuchtung in der Flugzeugkabine beobachtet werden.

Mit den Untersuchungen zum Einfluss des Darstellungsortes konnte bestätigt werden, dass die Darbietung der Referenzlichtquelle im oberen oder unteren Testfeld nur minimalen Einfluss auf die Abgleichergebnisse hat. Die Farbdifferenzen die sich bei umgekehrter Darbietungsposition ergaben, liegen im Bereich der Intrabeobachterstreuungen. Damit konnten Bias-Effekte, hervorgerufen durch die Position der dargestellten Reize, die von Fotios [FHC08] bei Helligkeitsabgleichen festgestellt wurden, für Farbabgleiche nicht bestätigt werden.

4.2 Wahrnehmbarkeit der Verbesserung

Im vorangegangenen Kapitel wurde bestätigt, dass unter Verwendung der an der TU Ilmenau weiterentwickelten Sehzapfen-Grundfunktionen 2006-TUIL bei der Mehrheit der Versuchsszenarien der Farbraumfehler zwischen dem Mittelwert der Abgleichergebnisse und dem Farbort der Referenzlichtquelle $\Delta u'v'_{K/G-Referenz}$ minimiert werden kann. Es stellt sich die Frage, ob diese teils kleinen Verbesserungen für die Probanden tatsächlich wahrnehmbar sind. Daher sollte mit subjektiven Farbdifferenzbewertungen getestet werden, wie gut die Farbwahrnehmung für die gesamte Gruppe der Probanden mit den neuen Spektralwertfunktionen simuliert werden kann. Die Ergebnisse soll-

ten zeigen, wie groß die wahrgenommenen Farbabstände unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen sind und ob die erzielte Verringerung des Farbabstandes $\Delta u'v'_{K/G-Referenz}$ zu einer signifikant verbesserten Modellierung der Farbwahrnehmung führt.

4.2.1 Versuchsbedingungen

Die Untersuchungen zur Wahrnehmbarkeit der verbesserten Farbbewertung durch die neuen Spektralwertfunktionen wurden mit dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Die Versuchsbedingungen entsprachen denen der Abgleichuntersuchungen. Aus der in Kapitel 3.6 beschriebenen Probandengruppe nahmen 19 Probanden an den Untersuchungen teil. Für alle Versuchsszenarien VS1 bis VS7 wurden subjektive Farbdifferenzbewertungen für die Farbörter des Lichtfarbensatzes 1 durchgeführt. Die Umgebungsbeleuchtung wurde jeweils mit den Normspektralwertfunktionen von 1931 an die zu untersuchende Farbtemperatur angepasst. Die Leuchtdichte der Umgebungsbeleuchtung lag bei 70 cd/m². Aufgrund der Diskrepanz zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Leuchtdichtewerten in den Abgleichversuchen, wurden bei den Tests zur subjektiven Farbdifferenzbewertung die Leuchtdichtewerte der beiden Testfelder mit Hilfe der $V_{Sharpe}(\lambda)$ -Funktion für das 2°-Beobachterfeld nach Sharpe [SSJJ11] auf ca. 132 cd/m² angepasst. Die mit Hilfe dieser Funktion ermittelten Leuchtdichtewerte ergaben in den Stabilitätsmessungen vor Durchführung der Untersuchungen für die Referenzfläche einen Mittelwert von $(132,2 \pm 4,1)$ cd/m² und für die Testfläche einen Wert von $(132,6 \pm 2,4)$ cd/m². Bei einer Bewertung der Testfelder mit der Hellempfindlichkeitsfunktion für ein 10°-Beobachterfeld nach Sharpe ergab sich eine Abweichung von 1,7 Prozent zwischen Referenz- und Testfeld. Um sicherzustellen, dass sich die eingestellten Spektralzusammensetzungen der Referenz- und Testlichtquellen über den Verlauf der Untersuchungsreihe nicht änderten, wurden vor und nach der gesamten Versuchsreihe Stabilitätsmessungen durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Referenz- als auch die Testlichtquelle für alle Versuchsszenarien bei allen untersuchten Farbtemperaturen vermessen. Da die Ansteuerung der Testlichtquelle mit sechs unterschiedlichen Spektralwertfunktionen stattfand, wurde die Stabilitätsmessung der Testlichtquelle sechs mal mit den unterschiedlichen An-

steuerungen wiederholt. Für die Diskrepanz zwischen den gemessenen u' - und v' -Werten der Referenz- und Testlichtquelle ergaben sich vor den Untersuchungen maximale Abweichungen von $\Delta u', \Delta v' = 0,0002$. Für die Versuchsszenarien VS1 bis VS6 änderte sich dieser Wert über den gesamten Untersuchungszeitraum nicht. Lediglich für Versuchsszenario VS7 ergaben sich bei den Stabilitätsmessungen nach der Untersuchungsreihe maximale Abweichungen von $\Delta u', \Delta v' = 0,0009$, zwischen den gemessenen u' - und v' -Werten der Referenz- und Testlichtquelle. Selbst dieser Wert liegt deutlich unter der minimalen Intrabeobachterstreuung von $\Delta u', \Delta v' = 0,0020$. Daher kann davon ausgegangen werden, dass alle Versuche mit identischen Farbörtern der Spektren durchgeführt wurden. Die Leuchtdichte der Referenzlichtquelle nahm über den Verlauf der Untersuchungen um ca. fünf Prozent zu. Nach Schierz [SVB08] werden Leuchtdichteunterschiede aneinander grenzender homogener Flächen ab fünf Prozent Differenz gerade wahrgenommen und sind weit davon entfernt, störend zu wirken. Daher wird der Einfluss der Leuchtdichtedifferenz auf die Farbdifferenzbewertungen als vernachlässigbar angenommen.

4.2.2 Versuchsaufbau

In subjektiven Bewertungstests bewerteten die Probanden jeweils die Farbdifferenz zwischen Referenz- und Testlichtquelle auf einer Skala von 0 bis 8. Die Skala wurde so beschriftet, dass eine Abstufung von 'nicht wahrnehmbar' (0), 'gerade wahrnehmbar' (2), 'gering' (4), 'deutlich' (6) zu 'sehr groß' (8) mit den entsprechenden Werten in Klammern korrespondierte. Abbildung 4.26 zeigt schematisch den Versuchsaufbau der Tests zur Untersuchung der Wahrnehmbarkeit der verbesserten Abbildung visuell gleich wahrgenommener Lichtfarben auf denselben Farbbort durch die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-2°/10° unter Laborbedingungen. Jeder Proband absolvierte zwei Versuchsdurchläufe. Einmal bewertete er die Farbdifferenzen zwischen den beiden Testfeldern im 2°- und einmal im 10°-Beobachterfeld. Für den Test der Farbwahrnehmung in der jeweiligen Feldgröße wurden die Spektralwertfunktionen verwendet, die für die entsprechenden Standardbeobachter ermittelt wurden. Das bedeutet, bei den Versuchen im 2°-Beobachterfeld kamen die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 im Vergleich zu den

Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und den Spektralwertfunktionen der TU Ilmenau 2006-TUIL-2° zum Einsatz. Analog bezog sich die Untersuchung im 10°-Beobachterfeld auf die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 und die Spektralwertfunktionen CIE-2006-10° und 2006-TUIL-10°. Die Bewertung fand innerhalb der einzelnen Farbgruppen bei 3500 K, 5000 K und 6500 K statt. Damit blieb in einem Bewertungsdurchlauf die Umgebungsbeleuchtung gleich und die Gesamtfeldadaptation des Probanden blieb unverändert. Die Spektralverteilung der Referenzlichtquelle änderte sich abhängig vom dargebotenen Versuchsszenario. Unabhängig von den verwendeten Spektralwertfunktionen wurde je Versuchsszenario immer dasselbe Referenzspektrum verwendet. Die Berechnung der Spektralzusammensetzung

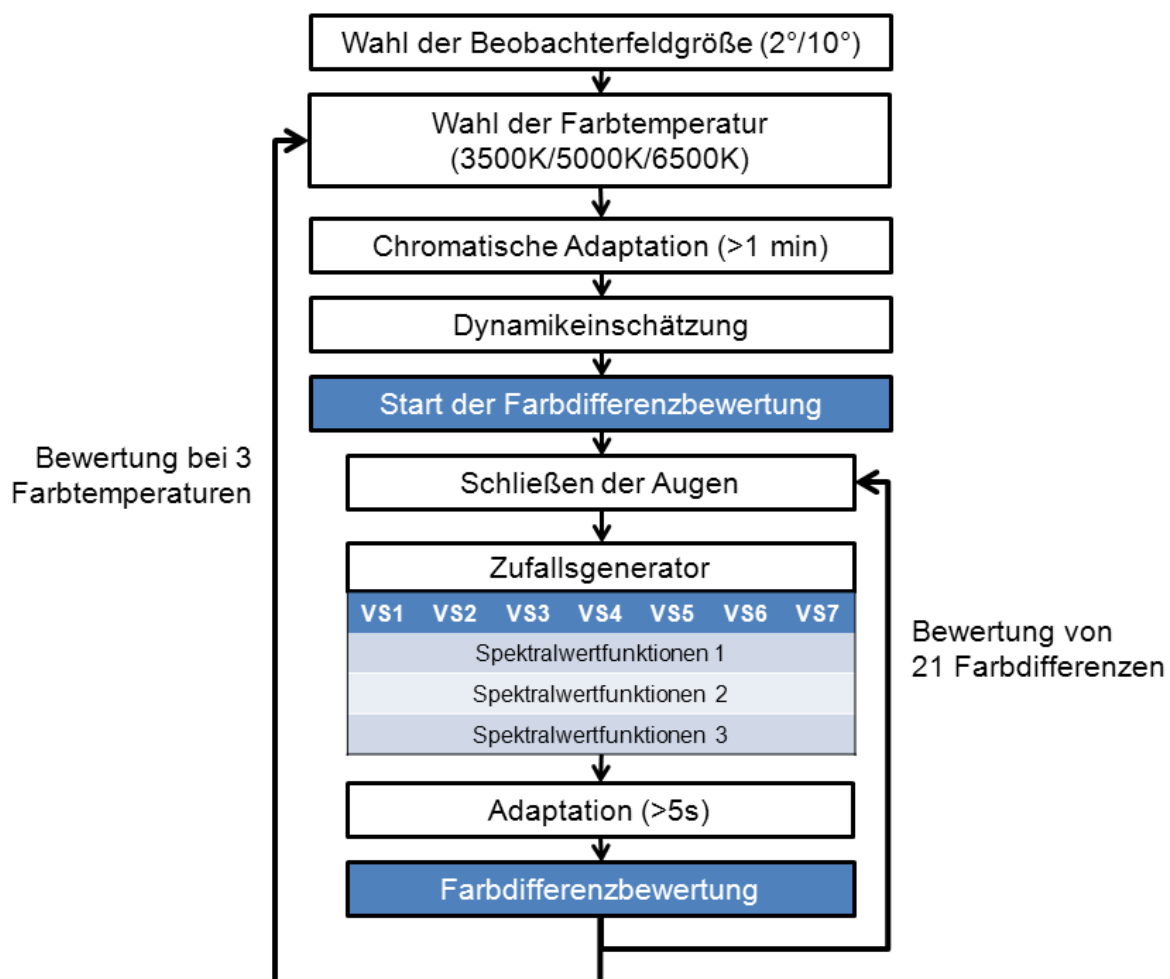


Abbildung 4.26 – Schematische Darstellung des Versuchsablaufs der Tests zur Untersuchung der Wahrnehmbarkeit der verbesserten Abbildung visuell gleich wahrgenommener Lichtfarben auf denselben Farbbort durch die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL.

für den gewünschten Farbort fand auf Basis der Normspektralwertfunktionen von 1931 statt. Lediglich die spektrale Zusammensetzung der Testlichtquelle wurde mittels der verwendeten Spektralwertfunktionen angepasst. Zunächst durfte der Proband jeweils innerhalb einer Farbtemperatur alle Kombinationen aus Versuchsszenarien und spektralen Bewertungsfunktionen in zufälliger Reihenfolge durchsehen. Erst, wenn er alle Möglichkeiten einmal gesehen hatte und damit die Möglichkeit hatte, den Dynamikumfang der dargebotenen Farbdifferenzen zu erfassen, begann der eigentliche Test. Der Proband bewertete je Farbtemperatur 21 dargebotene Farbdifferenzen. Er wurde angehalten die Augen während des Umschaltvorgangs zu schließen und die Bewertung erst nach einer Adaptationszeit von mindestens 5 Sekunden abzugeben, wenn die erste Phase der chromatischen Adaptation abgeschlossen war [FR95]. Der Proband wurde angehalten kein Urteil abzugeben, solange sich kein statischer Farbeindruck bei ihm eingestellt hatte. Sobald der Proband seine Bewertung abgegeben hatte, schloss er wieder die Augen. Der Versuchsleiter schaltete eine Szene weiter und signalisierte dem Probanden nach dem erfolgreichen Umschaltvorgang, die Augen wieder zu öffnen. Die Reihenfolge, in der die Kombinationen aus Versuchsszenario und verwendeten Spektralwertfunktionen dargeboten wurden, basiert auf dem Zufallsprinzip. Hierzu wurde ein Programm basierend auf Zufallszahlen programmiert, das die einzelnen Kombinationen aus Versuchsszenario und verwendeten Spektralwertfunktionen ansteuerte.

4.2.3 Ergebnisse

Zur Auswertung der subjektiven Bewertung der Farbdifferenzen zwischen den mittels unterschiedlichen Spektralwertfunktionen angeglichenen Testflächen werden zum einen die Mediane der Bewertungsergebnisse ermittelt und bewertet. Zum anderen wird mit Hilfe des in Kapitel 3.8.2.1 beschriebenen Wilcoxon-Tests geprüft, ob die wahrgenommenen Farbdifferenzen bei Ansteuerung der Testlichtquelle mit den neuen Spektralwertfunktionen signifikant kleiner sind, als bei Ansteuerung mit den Normspektralwertfunktionen von 1931 und 1964, bzw. mit den Spektralwertfunktionen der CIE von 2006.

In Abbildung 4.27 sind die Box-Whisker-Plots der subjektiven Farbdifferenzbewertungen im 2°-Beobachterfeld dargestellt. Die Mediane der Farbdifferen-

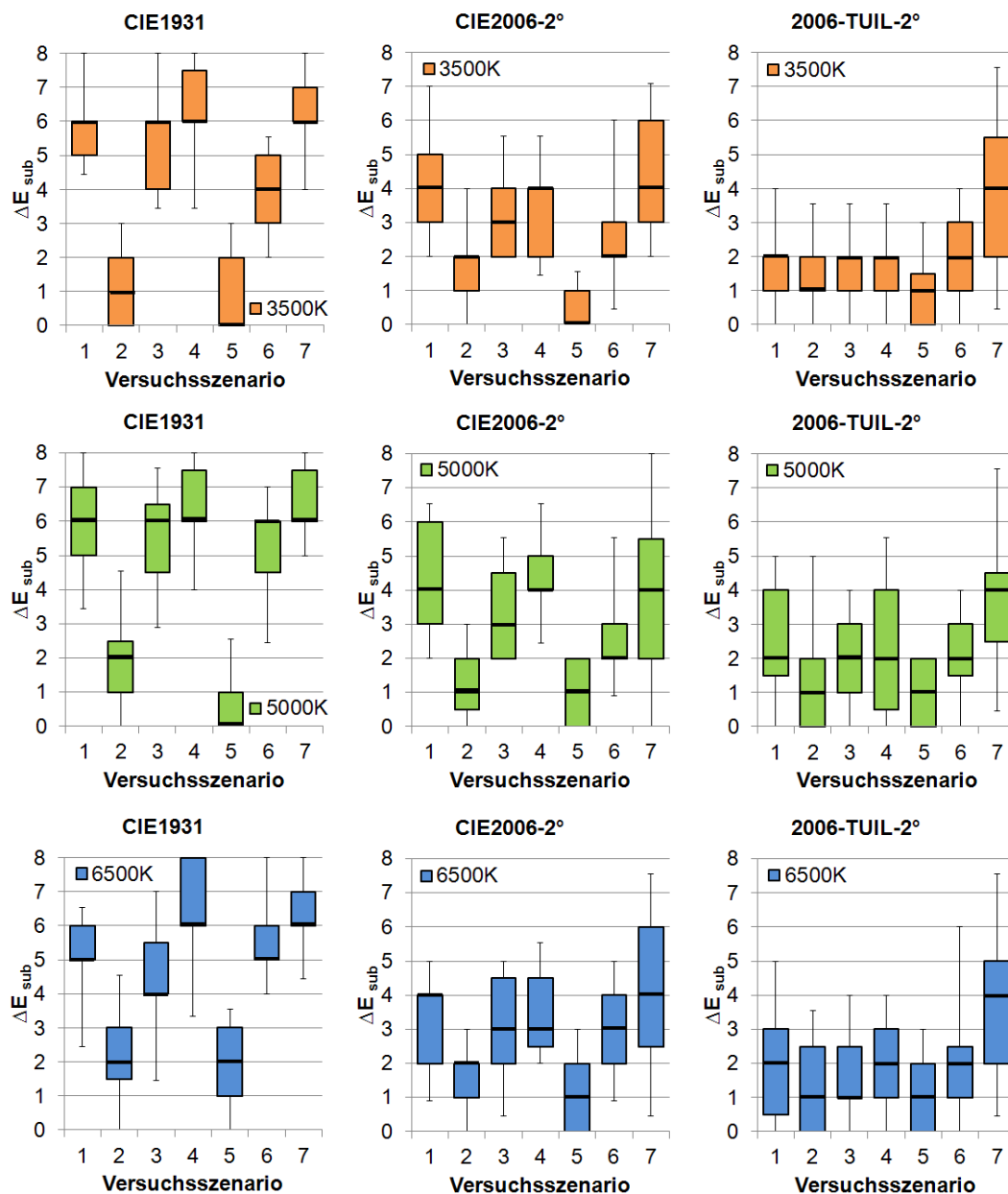


Abbildung 4.27 – Box-Whisker-Plots ($n=20$) der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} zwischen den beiden Testlichtfeldern bei den subjektiven Farbdifferenzbewertungen im 2°-Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7. Die Whisker stellen die 2,5%- bzw. 97,5%-Perzentile der Bewertungsergebnisse dar.

zen zwischen Test- und Referenzlichtquelle nehmen für Versuchsszenario VS2 und VS5 unabhängig von den verwendeten Spektralwertfunktionen Werte zwischen $\Delta E_{sub} = 1$ und $\Delta E_{sub} = 2$ an. Die mittlere wahrgenommene Farbdifferenz ist demnach 'nicht wahrnehmbar' bis 'gerade wahrnehmbar' und liegt an der Wahrnehmungsschwelle. Für die Versuchsszenarien VS1, VS3, VS4 und VS6 nahmen die Probanden unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen CIE1931 'kleine' ($\Delta E_{sub} = 4$) bis 'deutliche' ($\Delta E_{sub} = 6$) Farb-

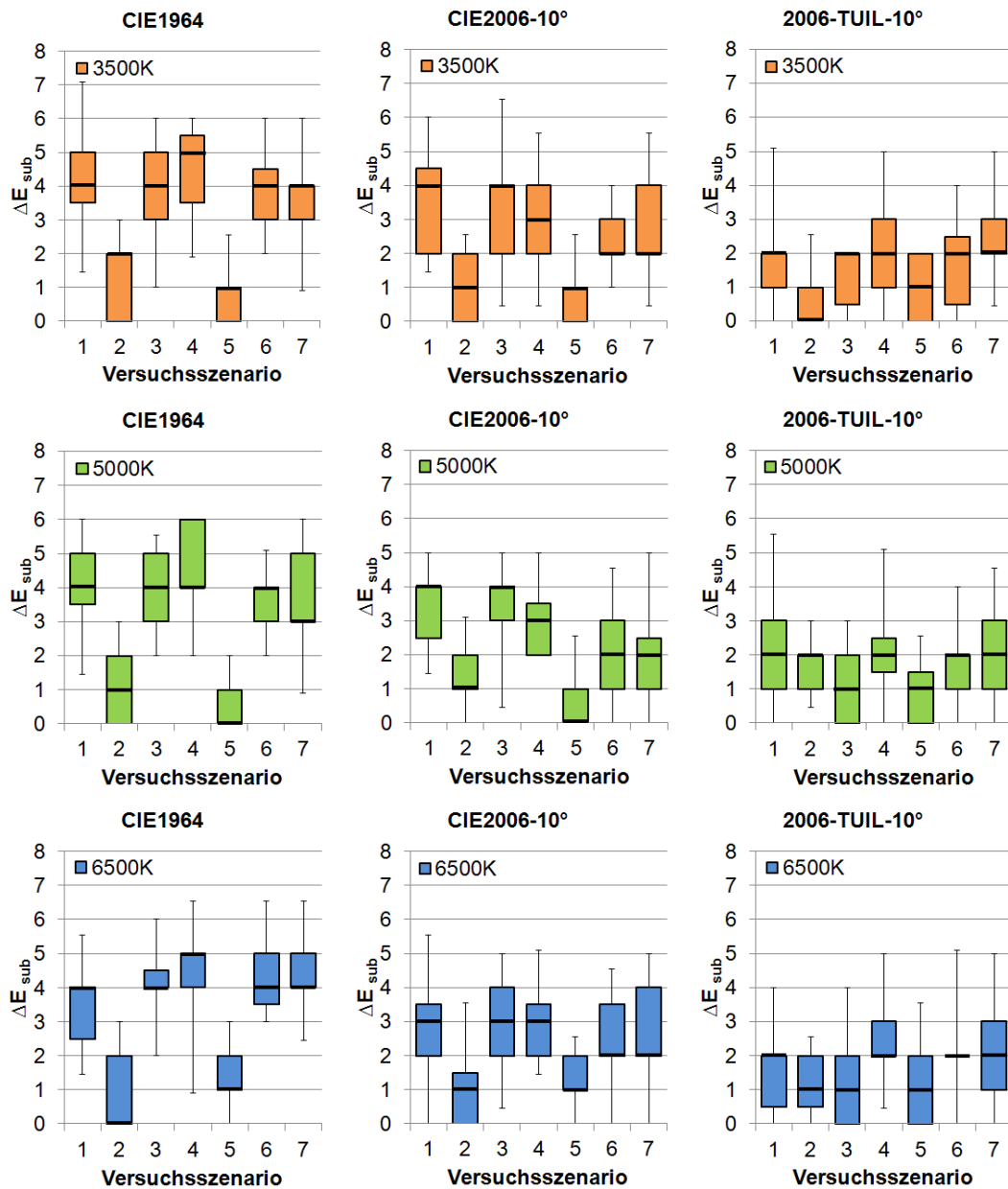


Abbildung 4.28 – Box-Whisker-Plots ($n=20$) der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} zwischen den beiden Testlichtfeldern bei den subjektiven Farbdifferenzbewertungen im 10°-Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7. Die Whisker stellen die 2,5%- bzw. 97,5%-Perzentile der Bewertungsergebnisse dar.

differenzen wahr. Unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006 werden die Farbdifferenzen als 'klein' ($\Delta E_{sub} = 4$) wahrgenommen. Mit den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° liegen die Mediane für die Versuchsszenarien VS1 bis VS6 im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{sub} = 1..2$). Für Versuchsszenario VS7 kann die wahrgenommene Farbdifferenz nur von 'deutlichen' ($\Delta E_{sub} = 6$) auf 'kleine' ($\Delta E_{sub} = 4$) Farbdifferenzen reduziert werden. Die Streuung der wahrgenommenen Farbdifferenzen ist bei diesem

Versuchsszenario unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° besonders groß. Die große Streuung lässt sich durch die besonders große Interprobandenstreuung beim Vergleich der verwendeten Spektralzusammensetzungen erklären. Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen ist die Streuung geringer, da die wahrgenommenen Farbdifferenzen für alle Beobachter so groß sind, dass die Streuung keinen feststellbaren Einfluss nimmt. Wendet man den Wilcoxon-Test an, kann ermittelt werden, bei welchen Versuchsszenarien die neuen Spektralwertfunktionen zu einer signifikanten Verringerung der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenz führen. Die sich ergebenden T- und T'-Werte sind mit den dazugehörigen kritischen Werten für den Wilcoxon-Test [Bor05] (S.829) tabellarisch in Anhang A.9 abgegeben. Unterschreitet der errechnete T-Wert den kritischen T-Wert, wird die Nullhypothese H_0 , die besagt, dass sich die zentralen Tendenzen der Populationen, aus denen die Stichproben stammen nicht unterscheiden, abgelehnt. Alle T-Werte, die den kritischen tabellierten T-Wert unterschreiten, sind in der Tabelle hervorgehoben. Aus der Tabelle lässt sich ablesen, dass sowohl die Spektralwertfunktionen CIE2006-2° als auch die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° für alle Versuchsszenarien außer VS2 und VS5 eine signifikante Verringerung des wahrgenommenen Farbabstands liefern. Da die wahrgenommenen Farbdifferenzen bei VS2 und VS5 bereits unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 an der Wahrnehmungsschwelle liegen, ist es unmöglich für diese eine deutliche Verringerung der Farbdifferenz zu erreichen. Im Vergleich zu den Spektralwertfunktionen CIE2006-2° können durch die Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° die Farbdifferenzen für Versuchsszenario VS1, VS3 und VS4 nochmals signifikant verbessert werden.

Abbildung 4.28 zeigt die Box-Whisker-Plots der wahrgenommenen Farbdifferenzen für die Untersuchungen im 10°-Beobachterfeld. Auch bei den Untersuchungen im 10°-Beobachterfeld liegen die wahrgenommenen Farbdifferenzen für Versuchsszenario VS2 und VS5, unabhängig von den verwendeten Spektralwertfunktionen, im 'nicht wahrnehmbaren' bis 'gerade wahrnehmbaren' Bereich. Für die anderen Versuchsszenarien sind die erzielten Verbesserungen gegenüber den Normspektralwertfunktionen bei den Versuchen im 10°-Beobachterfeld weniger stark ausgeprägt als bei den Versuchen im 2°-Beobachterfeld. Zum einen sind die wahrgenommenen Farbdifferenzen

zwischen Referenz- und Testfläche unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen CIE1964 nicht so groß wie im 2°-Beobachterfeld unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen CIE1931. Die wahrgenommenen Farbdifferenzen liegen hier zwischen $\Delta E_{sub} = 3$ und $\Delta E_{sub} = 5$. Unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-10° können die wahrgenommenen Farbdifferenzen auf Werte zwischen $\Delta E_{sub} = 2$ und $\Delta E_{sub} = 4$ verringert werden. Die Auswertung mit dem Wilcoxon-Testverfahren zeigt, dass die wahrgenommenen Farbdifferenzen nur für Versuchsszenario VS4, VS6 und VS7 signifikant verringert werden können. Mit Hilfe der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° werden die wahrgenommenen Farbabstände im Mittel für alle Versuchsszenarien auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle $\Delta E_{sub} = 1..2$ reduziert. Aus Tabelle A.13 im Anhang A.9 geht hervor, dass die wahrgenommenen Farbdifferenzen gegenüber der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964 für alle Versuchsszenarien, ausgenommen VS2 und VS5, signifikant verringert werden können.

4.2.4 Diskussion

Das Ziel der subjektiven Farbdifferenzbewertungen bestand darin herauszufinden, ob die relativ kleinen Verringerungen der Farbraumfehler durch die Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL gegenüber den Spektralwertfunktionen CIE2006 zu einer wahrnehmbaren Verbesserung der Übereinstimmung der Testfelder führen. Die subjektiven Farbdifferenzbewertungen haben bestätigt, dass es mit den neuen Funktionen 2006-TUIL gelingt, die Mediane der wahrgenommenen Farbdifferenzen für die Wahrnehmung im 2°- und im 10°-Beobachterfeld auf Werte im 'gerade wahrnehmbaren' Bereich ($\Delta E_{sub} = 0..2$) zu reduzieren. Lediglich für die Bewertung des Versuchsszenario VS7 unter Beobachtung im 2°-Beobachterfeld liegen die Werte noch im Bereich 'kleiner' wahrnehmbarer Farbdifferenzen ($\Delta E_{sub} = 4$). Hierfür ist die große Intrabeobachterstreuung verantwortlich. Selbst, wenn die neuen Funktionen ideale Ergebnisse mit einem Abstand von $\Delta u'v'_{Referenz} = 0$ liefern, können einzelne Probanden aufgrund der teils starken interpersonellen Streuungen Farbunterschiede zwischen Referenz- und Testlichtquelle wahrnehmen. Damit ergibt sich automatisch ein Grundrauschen, das eine Schwelle darstellt, die die visuellen Bewertungen trotz perfekter Abbildung des Mittel-

Tabelle 4.6 – Zusammenfassung der Mittelwerte (n=20) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ und der Mediane (n=19) der wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} aus dem 2°-Beobachterfeld und Signifikanzbewertung (signifikant $\hat{=}$ 'S', nicht signifikant $\hat{=}$ 'N') der Verringerung der Farbraumfehler, bzw. der wahrgenommenen Farbdifferenzen.

| Versuchsszenario | CCT | $\Delta u'v'_{K-Ref}$ | | | ΔE_{sub} | | | Signifikanz $\Delta u'v'_{K-Ref}$ - Verringerung | | | Signifikanz ΔE_{sub} - Verringerung | | |
|------------------|--------|-----------------------|------------|--------------|------------------|------------|--------------|--|------------------------|---------------------------|---|------------------------|---------------------------|
| | | CIE1931 | CIE2006-2° | 2006-TUIL-2° | CIE1931 | CIE2006-2° | 2006-TUIL-2° | CIE2006-2° < CIE1931 | 2006-TUIL-2° < CIE1931 | 2006-TUIL-2° < CIE2006-2° | CIE2006-2° < CIE1931 | 2006-TUIL-2° < CIE1931 | 2006-TUIL-2° < CIE2006-2° |
| VS1 | 3500 K | 0,0089 | 0,0034 | 0,0011 | 6 | 4 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS1 | 5000 K | 0,0116 | 0,0046 | 0,0010 | 6 | 4 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS1 | 6500 K | 0,0117 | 0,0050 | 0,0013 | 5 | 4 | 2 | S | S | S | S | S | N |
| VS2 | 3500 K | 0,0015 | 0,0006 | 0,0005 | 1 | 2 | 1 | S | S | N | N | N | N |
| VS2 | 5000 K | 0,0021 | 0,0008 | 0,0006 | 2 | 1 | 1 | S | S | N | N | N | N |
| VS2 | 6500 K | 0,0029 | 0,0013 | 0,0006 | 2 | 2 | 1 | S | S | N | N | N | N |
| VS3 | 3500 K | 0,0075 | 0,0037 | 0,0014 | 6 | 3 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS3 | 5000 K | 0,0108 | 0,0056 | 0,0025 | 6 | 3 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS3 | 6500 K | 0,0104 | 0,0052 | 0,0020 | 4 | 3 | 1 | S | S | S | S | S | S |
| VS4 | 3500 K | 0,0095 | 0,0040 | 0,0009 | 6 | 4 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS4 | 5000 K | 0,0136 | 0,0048 | 0,0013 | 6 | 4 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS4 | 6500 K | 0,0165 | 0,0059 | 0,0013 | 6 | 3 | 2 | S | S | S | S | S | S |
| VS5 | 3500 K | 0,0015 | 0,0007 | 0,0006 | 0 | 0 | 1 | N | N | N | N | N | N |
| VS5 | 5000 K | 0,0022 | 0,0007 | 0,0012 | 0 | 1 | 1 | S | N | N | N | N | N |
| VS5 | 6500 K | 0,0040 | 0,0008 | 0,0022 | 2 | 1 | 1 | S | S | N | N | N | N |
| VS6 | 3500 K | 0,0055 | 0,0018 | 0,0013 | 4 | 2 | 2 | S | S | N | S | S | N |
| VS6 | 5000 K | 0,0091 | 0,0029 | 0,0015 | 6 | 2 | 2 | S | S | N | S | S | N |
| VS6 | 6500 K | 0,0116 | 0,0032 | 0,0021 | 5 | 3 | 2 | S | S | N | S | S | N |
| VS7 | 3500 K | 0,0097 | 0,0038 | 0,0024 | 6 | 4 | 4 | S | S | N | S | S | N |
| VS7 | 5000 K | 0,0119 | 0,0038 | 0,0042 | 6 | 4 | 4 | S | S | N | S | S | N |
| VS7 | 6500 K | 0,0144 | 0,0035 | 0,0040 | 6 | 4 | 4 | S | S | N | S | S | N |

werts aller Abgleichergebnisse auf die Referenzlichtquelle nicht unterschreiten können. Abhängig von den verwendeten Spektralzusammensetzungen der Vergleichsspektren ist dieses Rauschen stärker oder weniger stark ausgeprägt. Damit begründet sich, warum die wahrgenommenen Farbdifferenzen bei den Versuchen im 2°-Beobachterfeld bei Versuchsszenario VS7 auch mit den neuen Spektralwertfunktionen nicht unter Werte von $\Delta E_{sub} = 4$ gebracht werden können.

Tabelle 4.7 – Zusammenfassung der Mittelwerte ($n=20$) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ und der Mediane ($n=19$) der wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} aus dem 10°-Beobachterfeld und Signifikanzbewertung (signifikant $\hat{=}$ 'S') der Verringerung der Farbraumfehler, bzw. der wahrgenommenen Farbdifferenzen.

| Versuchsszenario | CCT | $\Delta u'v'_{G-Ref}$ | | | ΔE_{sub} | | | Signifikanz $\Delta u'v'_{G-Ref}$ - Verringerung | | | Signifikanz ΔE_{sub} - Verringerung | | |
|------------------|--------|-----------------------|-------------|---------------|------------------|-------------|---------------|--|-------------------------|-----------------------------|---|-------------------------|-----------------------------|
| | | CIE1964 | CIE2006-10° | 2006-TUIL-10° | CIE1964 | CIE2006-10° | 2006-TUIL-10° | CIE2006-10° < CIE1964 | 2006-TUIL-10° < CIE1964 | 2006-TUIL-10° < CIE2006-10° | CIE2006-10° < CIE1964 | 2006-TUIL-10° < CIE1964 | 2006-TUIL-10° < CIE2006-10° |
| VS1 | 3500 K | 0,0048 | 0,0037 | 0,0019 | 4 | 4 | 2 | S | S | S | N | S | S |
| VS1 | 5000 K | 0,0059 | 0,0044 | 0,0017 | 4 | 4 | 2 | S | S | S | N | S | S |
| VS1 | 6500 K | 0,0056 | 0,0041 | 0,0017 | 4 | 3 | 2 | S | S | S | N | S | N |
| VS2 | 3500 K | 0,0014 | 0,0013 | 0,0010 | 2 | 1 | 0 | N | N | N | N | N | N |
| VS2 | 5000 K | 0,0013 | 0,0008 | 0,0005 | 1 | 1 | 2 | N | S | N | N | N | N |
| VS2 | 6500 K | 0,0015 | 0,0014 | 0,0012 | 0 | 1 | 1 | N | N | N | N | N | N |
| VS3 | 3500 K | 0,0040 | 0,0033 | 0,0005 | 4 | 4 | 2 | N | S | S | N | S | S |
| VS3 | 5000 K | 0,0055 | 0,0046 | 0,0007 | 4 | 4 | 1 | S | S | S | N | S | S |
| VS3 | 6500 K | 0,0053 | 0,0043 | 0,0005 | 4 | 3 | 1 | S | S | S | S | S | S |
| VS4 | 3500 K | 0,0055 | 0,0039 | 0,0013 | 5 | 3 | 2 | S | S | S | S | S | N |
| VS4 | 5000 K | 0,0070 | 0,0044 | 0,0023 | 4 | 3 | 2 | S | S | S | S | S | N |
| VS4 | 6500 K | 0,0081 | 0,0049 | 0,0032 | 5 | 3 | 2 | S | S | N | S | S | N |
| VS5 | 3500 K | 0,0012 | 0,0014 | 0,0014 | 1 | 1 | 1 | N | N | N | N | N | N |
| VS5 | 5000 K | 0,0006 | 0,0005 | 0,0015 | 0 | 0 | 1 | N | N | N | N | N | N |
| VS5 | 6500 K | 0,0022 | 0,0012 | 0,0025 | 1 | 1 | 1 | S | N | N | N | N | N |
| VS6 | 3500 K | 0,0041 | 0,0030 | 0,0024 | 4 | 2 | 2 | N | S | N | S | S | N |
| VS6 | 5000 K | 0,0049 | 0,0026 | 0,0023 | 4 | 2 | 2 | S | S | N | S | S | N |
| VS6 | 6500 K | 0,0061 | 0,0030 | 0,0032 | 4 | 2 | 2 | S | S | N | S | S | N |
| VS7 | 3500 K | 0,0052 | 0,0032 | 0,0036 | 4 | 2 | 2 | N | N | N | S | N | N |
| VS7 | 5000 K | 0,0057 | 0,0023 | 0,0043 | 3 | 2 | 2 | S | N | N | S | S | N |
| VS7 | 6500 K | 0,0060 | 0,0024 | 0,0057 | 4 | 2 | 2 | S | N | N | S | S | N |

In den Untersuchungen zur Farbdifferenzbewertung und in den Abgleichversuchen aus Kapitel 4.1 wurde mit derselben Probandengruppe die Farbwahrnehmung an denselben Farbörtern untersucht. Daher kann ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K/G-Referenz}$ und den Farbdifferenzbewertungen ΔE_{sub} hergestellt werden. Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 zeigen zusammengefasst die Mittelwerte der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K/G-Referenz}$ und die Mediane der wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} für die Unter-

suchungen im 2°- und im 10°-Beobachterfeld. Außerdem ist in den Tabellen mit einem 'S' gekennzeichnet, ob mit einem Satz Spektralwertfunktionen eine signifikante Verringerung des Farbraumfehlers erreicht wurde und ob eine signifikante Verringerung des wahrgenommenen Farbabstandes erzielt werden konnte. Damit kann bewertet werden, ob sich auch kleine signifikante Verringerungen der Farbraumfehler durch die Verwendung neuer Spektralwertfunktionen tatsächlich auf die Farbwahrnehmung auswirken. Aus Tabelle 4.6 lässt sich für die Untersuchungen im 2°-Beobachterfeld ablesen, dass für die Versuchsszenarien VS1, VS3, VS4, VS6 und VS7 jeweils dort signifikante Verbesserungen der wahrgenommenen Farbdifferenz auftreten, wo auch die Farbraumfehler signifikant verringert werden konnten. Lediglich bei Versuchsszenario VS2 und VS5 stimmt dies nicht immer überein. Das liegt daran, dass bereits die Farbraumfehler unter Verwendung der CIE Normspektralwertfunktionen so gering sind, dass keine signifikante Verringerung der visuell wahrgenommenen Farbdifferenz möglich ist. Bei den Untersuchungen im 10°-Beobachterfeld ergeben sich deutliche Abweichungen zwischen der Signifikanz der Verringerung der Farbraumfehler und der Verringerung der wahrgenommenen Farbdifferenzen. Die signifikanten Verringerungen der Farbdifferenz $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ beim Vergleich der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° gegenüber den Normspektralwertfunktionen CIE1964 führt für die Versuchsszenarien VS1, VS3, VS4 und VS6 auch zu einer signifikanten Verringerung des wahrgenommenen Farbabstandes zwischen den Testfeldern. Beim Vergleich der Spektralwertfunktionen CIE2006-10° mit den Normspektralwertfunktionen CIE1964 führen die signifikanten Verringerungen der Farbraumfehler für Versuchsszenario VS1 und VS3 nicht zu signifikanten Verringerungen der wahrgenommenen Farbdifferenzen. Die signifikante Verringerung der Farbraumfehler durch den Gebrauch der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° im Gegensatz zu den Spektralwertfunktionen CIE2006-10° bei den Versuchsszenarien VS1, VS3 und VS4 kann mit einer tatsächlich wahrnehmbaren Verbesserung nur für die Versuchsszenarien VS1 und VS3 signifikant bestätigt werden. Bei Versuchsszenario VS4 schlägt sich die Verringerung des Farbraumfehlers nicht in einer signifikanten Verkleinerung der wahrgenommenen Farbdifferenz nieder. Dies ist möglicherweise auf die große Interbeobachterstreuung bei VS4 zurückzuführen.

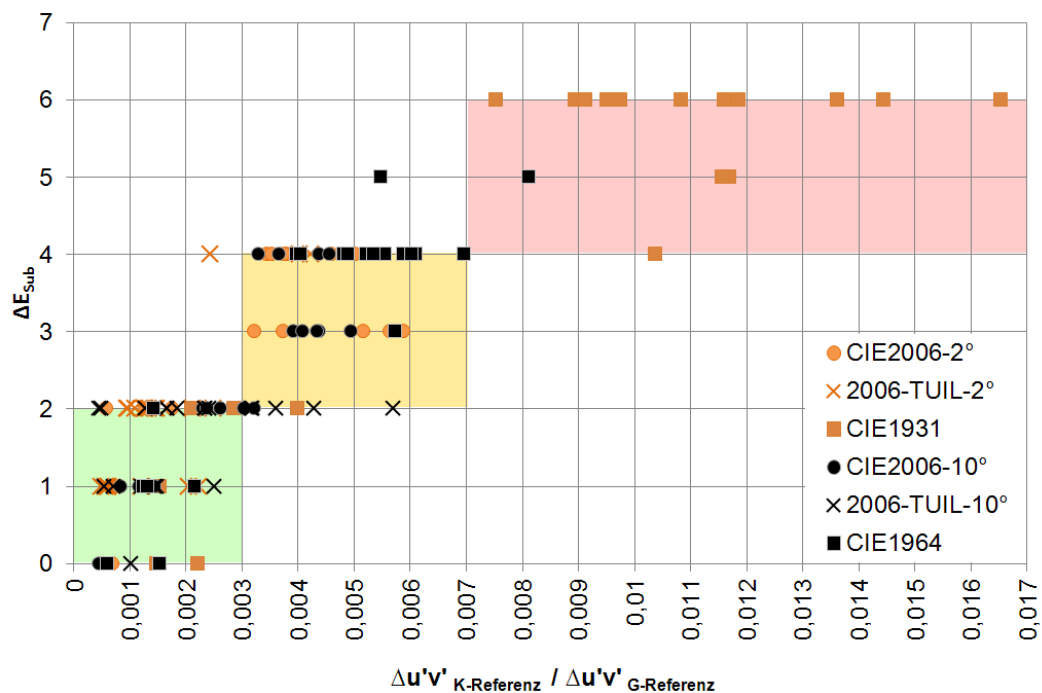


Abbildung 4.29 – Zusammenhang zwischen den Mittelwerten ($n=20$) der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ bzw. $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ und den Medianen ($n=19$) der wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} .

Insgesamt lassen sich mit den neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL die wahrgenommenen Farbdifferenzen zwischen den beiden Testfeldern gegenüber den Normspektralwertfunktionen der CIE für alle Versuchsszenarien signifikant verringern. Dies gilt sowohl für die Beobachtung im 2°-Beobachterfeld als auch im 10°-Beobachterfeld. In Abbildung 4.29 ist der Zusammenhang zwischen den errechneten Farbraumfehlern $\Delta u'v'_{K/G\text{-Referenz}}$ und den wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} dargestellt. Im Mittel ergibt sich eine Zuordnung der $\Delta u'v'$ -Werte zu den ΔE_{sub} -Werten entsprechend Tabelle 4.8. Allerdings ist diese Zuordnung nur als grober Anhaltspunkt für eine Einschätzung der Farbdifferenzen zu werten, da die Farbdifferenzbewertungen lediglich auf einer Ordinalskala bewertet wurden. Weitere Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen rechnerischen Farbabständen und wahrgenommenen Farbdifferenzen sollten unbedingt folgen.

Tabelle 4.8 – Zuordnung der wahrgenommenen Farbdifferenzen zu $\Delta u'v'$ -Werten, unabhängig von den verwendeten Spektralwertfunktionen.

| $\Delta u'v'$ | ΔE_{sub} | Beschreibung |
|----------------|------------------|--|
| 0,0000..0,0030 | 0..2 | Farbdifferenz nicht bis gerade wahrnehmbar |
| 0,0040..0,0070 | 3..4 | kleine Farbdifferenz wahrnehmbar |
| 0,0080..0,0170 | 5..6 | deutliche Farbdifferenz wahrnehmbar |

4.3 Validierung der neuen Kurven an anderen Farbörtern

Mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen Untersuchungen konnte die Anwendbarkeit der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL für weiße Lichtfarben gezeigt werden. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse für farbige Lichtfarben ist damit jedoch nicht zulässig. Mit weiteren Untersuchungen soll daher die Gültigkeit der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL an beliebigen Farbörtern überprüft werden. Eine perfekte Abbildung visuell gleicher Spektren auf denselben Farbart für alle Probanden wird aufgrund der Interbeobachterstreuung nie möglich sein. Das Ziel kann nur darin bestehen, die wahrgenommenen Farbdifferenzen auf das Maß der Interbeobachterstreuung zu reduzieren. Hier soll vor allem ermittelt werden, ob sich durch die Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL eine Verbesserung gegenüber den Ergebnissen unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen der CIE erzielen lässt. Zu diesem Zweck führten die Probanden erneut Farbdifferenzbewertungen bei gesättigten Lichtfarben des Lichtfarbensatzes 2 durch.

4.3.1 Versuchsbedingungen

Die Farbdifferenzbewertungen zur Validierung der neuen Kurven an anderen Farbörtern fanden in dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsaufbau statt. Es nahmen 19 der 20 in Kapitel 3.6 vorgestellten Testpersonen an den Untersuchungen teil. Die Leuchtdichte der Referenzlichtquelle betrug $(132,1 \pm 0,9) \text{ cd/m}^2$, bewertet mit der Hellempfindlichkeitsfunktion nach Sharpe für ein 2°-Beobachterfeld. Die Leuchtdichten der Testfelder wurden mit Hilfe der korrigierten $V_{\text{Sharpe}-2^\circ}(\lambda)$ -Funktion für das 2°-Beobachterfeld, ermittelt nach Sharpe [SSJJ11] auf Basis der 2°-Sehzapfen-Grundfunktionen, angepasst. Bei den Stabilitätsmessungen ergab sich für die mittlere Leuchtdichte der Testlichtquellen ein Wert von $(131,0 \pm 3,4) \text{ cd/m}^2$. Bewertet mit der Hellempfindlichkeitsfunktion für ein 10°-Beobachterfeld nach Sharpe [SSJJ11] wurde eine mittlere Abweichung der Leuchtdichte zwischen Referenz- und Testfeld von 2,4 Prozent ermittelt. Die Umgebungsleuchtdichte betrug ca. 100 cd/m^2 . Vor und nach den Untersuchungen wurden Stabilitätsmessungen zur Überprüfung der Farbstabilität durchgeführt. Die Farbabweichungen

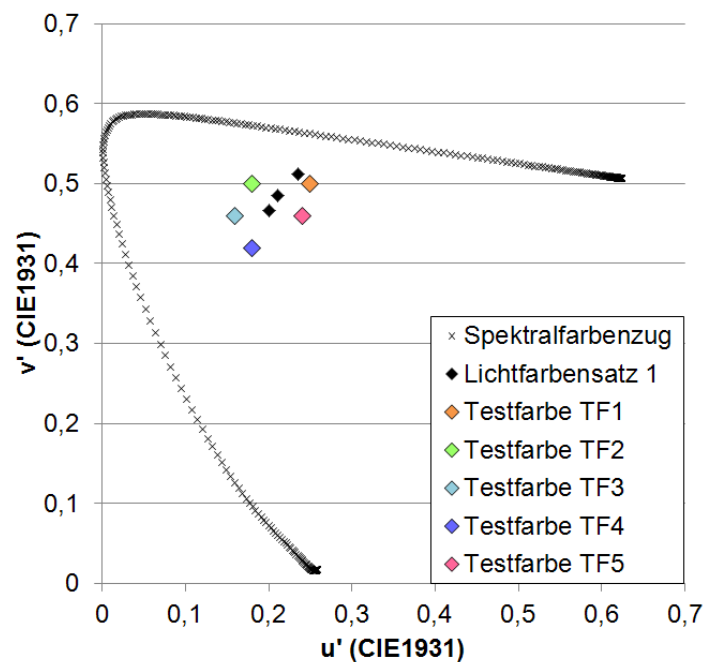


Abbildung 4.30 – Farbörter des Lichtfarbensatzes 2 im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

$\Delta u'$, $\Delta v'$ zwischen Test- und Referenzlichtquelle lagen vor und nach der gesamten Untersuchungsreihe bei Werten kleiner als 0,0008. Damit wurde sichergestellt, dass alle Probanden dieselben Farbvalenzdifferenzen visuell bewerteten. Diese Untersuchungen dienten dem Zweck, die Anwendbarkeit der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL in der Praxis zu prüfen. Daher wurden hier nur RGBW-LED-Spektren unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung miteinander verglichen. Versuchsszenario V1 stellt einen Vergleich zwischen zwei RGBW-Spektren mit LEDs desselben Typs aber leicht verschobenem Blauppeak der weißen LED dar. Versuchsszenario VS8 vergleicht TLR in RGBW-Kombination, wobei die grüne LED gegen die cyanfarbene LED der 8-LED-Lichtquelle ausgetauscht wurde, mit TLG in RGBW-Mischung. Bei Versuchsszenario VS9 wird eine RGBW-Kombination der 8-LED-Lichtquelle aus warmweißer, roter, cyanfarbener und blauer LED mit der Testlichtquelle TLG in RGBW-Mischung verglichen. Da in den vorherigen Versuchen bereits die Farbwahrnehmung bei weißen Lichtfarben untersucht wurde, sollten bei diesen Untersuchungen gesättigte Farben eingesetzt werden. Mit dem in Kapitel 3.5 beschriebene Lichtfarbensatz 2 wurde die Farbwahrnehmung rund um die bisher untersuchten Farbörter abgedeckt. Die zu untersuchenden Farbörter für die Ansteuerung der Referenzlichtquellen wurden zunächst basierend auf

den Normspektralwertfunktionen von 1931 ermittelt. Abbildung 4.30 zeigt die Farbörter des Lichtfarbensatzes 2 im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Normspektralwertfunktionen CIE1931. Trotz des scheinbar geringen Abstands zum Unbuntpunkt nahmen alle Probanden die Farben als deutlich gesättigt war.

4.3.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf der Untersuchungen zur Validierung der Verbesserung an anderen Farbörtern entsprach dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Versuchsablauf. Lediglich der Lichtfarbensatz 1 wurde gegen den Lichtfarbensatz 2 ausgetauscht. In dieser Versuchsreihe wurden von den Probanden bei fünf Testfarben TF1-TF5 jeweils für neun Kombinationen, aus drei Versuchsszenarien und drei Spektralwertfunktionen, Farbdifferenzbewertungen abgegeben. Die Untersuchungen wurden jeweils im 2°- und im 10°-Beobachterfeld durchgeführt. Die Farbdifferenzen wurden von den Probanden auf einer Skala von 0 bis 8 bewertet.

4.3.3 Ergebnisse

Die Auswertung der wahrgenommenen Farbdifferenzen an den Farbörtern des Lichtfarbensatzes 2 findet analog zur Auswertung der Untersuchungen zur Wahrnehmbarkeit der verbesserten Abbildung visuell gleicher Spektren in den Farbraum durch die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL in Kapitel 4.2 statt. Zum einen werden die Mediane der Farbdifferenzen ΔE_{sub} ausgewertet und zum anderen wird mittels Wilcoxon-Tests festgestellt, ob die wahrgenommenen Farbdifferenzen bei Ansteuerung der Testlichtquelle mit den neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL signifikant kleiner sind, als bei Ansteuerung mit den Normspektralwertfunktionen von 1931 und 1964, bzw. mit den Spektralwertfunktionen der CIE von 2006. Die Abbildungen 4.31 und 4.32 zeigen die Box-Whisker-Plots der Ergebnisse der Farbdifferenzbewertungen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 bei den Farbörtern TF1 bis TF5 des Lichtfarbensatzes 2. Aus den Diagrammen lässt sich erkennen, dass die wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL tendenziell geringer werden. Sowohl

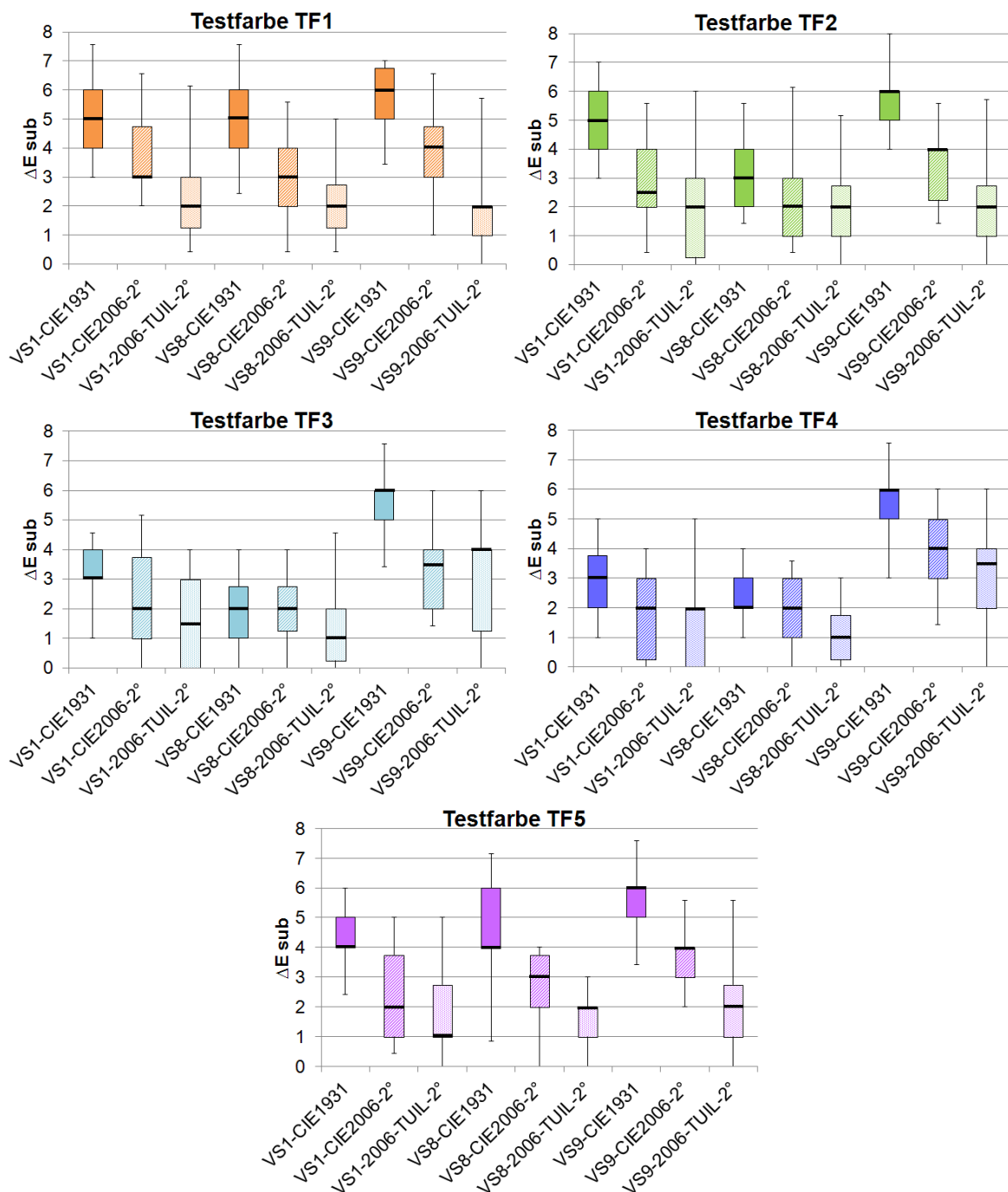


Abbildung 4.31 – Box-Whisker-Plots ($n=19$) der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} zwischen den beiden Testlichtfeldern bei den subjektiven Farbdifferenzbewertungen im 2°-Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Farben des Lichtfarbensatzes 2. Die Whisker stellen die 2,5%- bzw. 97,5%-Perzentile der Bewertungsergebnisse dar.

für die Farbdifferenzbewertungen im 2°-Beobachterfeld als auch im 10°-Beobachterfeld treten die deutlichsten Farbraumfehler unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen bei Versuchsszenario VS9 für alle Testfarben und unabhängig vom Versuchsszenario bei den Testfarben TF1 (Orange) und

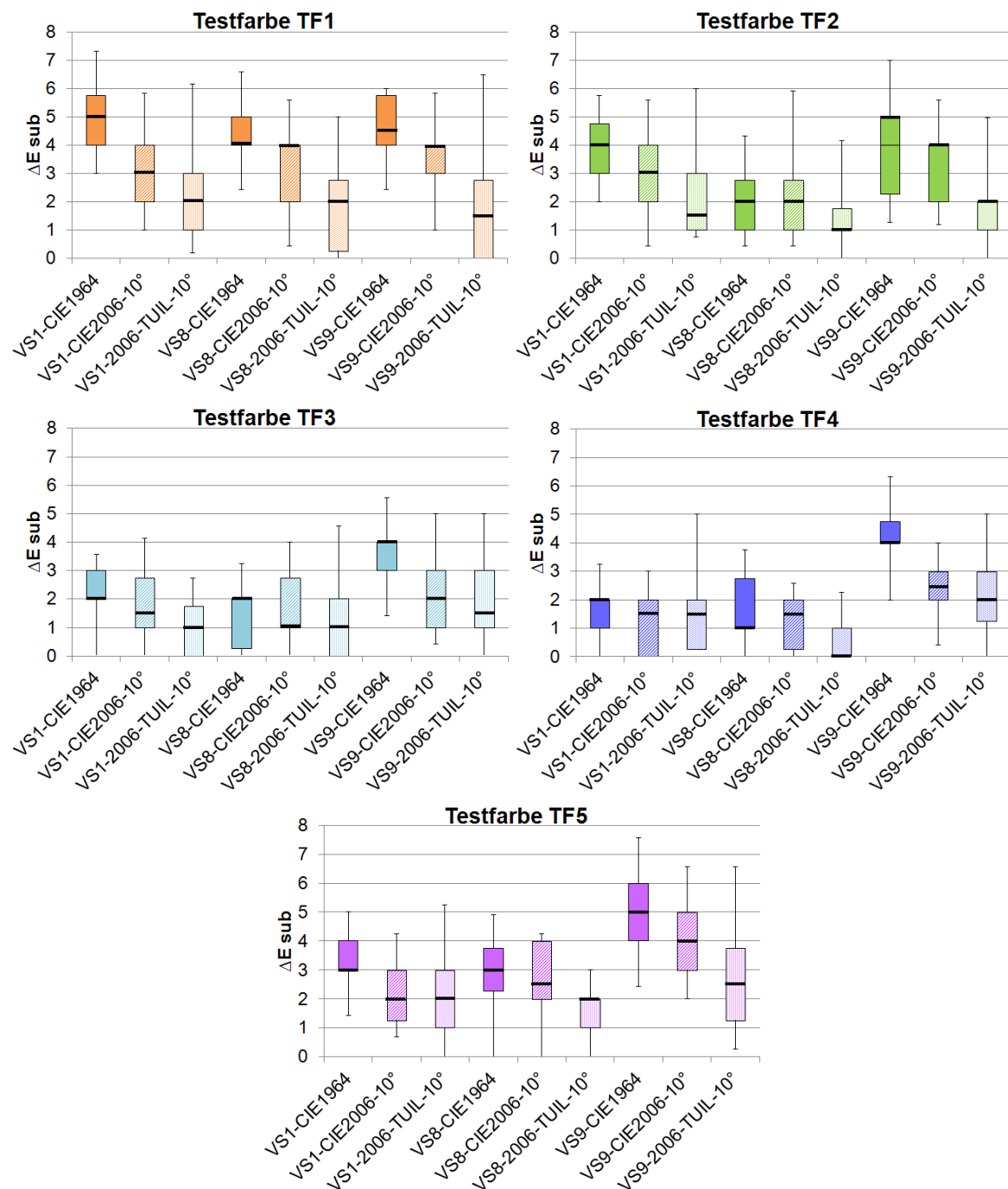


Abbildung 4.32 – Box-Whisker-Plots ($n=19$) der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} zwischen den beiden Testlichtfeldern bei den subjektiven Farbdifferenzbewertungen im 10°-Beobachterfeld für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Farben des Lichtfarbensatzes 2. Die Whisker stellen die 2,5%- bzw. 97,5%-Perzentile der Bewertungsergebnisse dar.

TF5 (Magenta) auf. In diesen Untersuchungen bewerteten die Probanden die Farbdifferenzen zwischen den beiden Testfeldern im 2°-Beobachterfeld als 'deutlich wahrnehmbar' ($\Delta E_{sub} = 6$) und im 10°-Beobachterfeld als 'klein' bis 'deutlich wahrnehmbar' ($\Delta E_{sub} = 5$). Betrachtet man die Spektren dieser Ver-

Tabelle 4.9 – Anzahl der Versuche (Kombinationen aus Versuchsszenario und verwendeter Testfarbe) bei denen ein Satz Spektralwertfunktionen signifikant geringere wahrgenommene Farbdifferenzen liefert als der andere. Die Ergebnisse von 15 Versuchen wurden verglichen.

| Vergleich | Anzahl signifikanter Verbesserungen |
|---|-------------------------------------|
| $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$ | 14 |
| $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$ | 11 |
| $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ)$ | 6 |
| $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$ | 11 |
| $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$ | 8 |
| $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ)$ | 5 |

suche mit besonders großen Farbdifferenzbewertungen unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen, fällt auf, dass diese besonders deutliche Verschiebungen der Peakwellenlänge der blauen LED im Wellenlängenbereich zwischen $\lambda = 410$ nm und $\lambda = 510$ nm aufweisen (vgl. Abbildungen A.4 und A.8 in Anhang A.2). Damit wird die zuvor aufgestellte Hypothese bestärkt, dass die Fehlanpassung der Augenempfindlichkeitsfunktionen durch die Normspektralwertfunktionen in diesem Wellenlängenbereich liegt. Mit Hilfe der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL können die Mediane der Farbdifferenzbewertungen für alle Testfarben bei allen Versuchsszenarien bei den Untersuchungen im 2° - und im 10° -Beobachterfeld auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{sub} = 1..2$) reduziert werden. Die einzige Ausnahme stellen die Ergebnisse der Testfarben TF3 und TF4 unter Verwendung des Versuchsszenario VS9 dar. Hier liegen die Mediane bei $\Delta E_{sub} = 4$. Bei diesen beiden Versuchen liegen die massivsten Spektralunterschiede im Bereich zwischen 440 nm und 500 nm vor (vgl. Abbildungen 3.7 und A.7 in Anhang A.2). Dies legt die Vermutung nahe, dass auch die neuen Spektralwertfunktionen TUIL-2006- 2° die Augenempfindlichkeiten nicht exakt genug nachbilden, was sich jedoch nur bei extremen Spektralvergleichen zeigt.

Die Ergebnisse der Wilcoxon-Tests auf Signifikanz der Verringerung der wahrgenommenen Farbdifferenzen sind in den Tabellen A.15 bis A.20 im Anhang A.9.2 zu finden. Tabelle 4.9 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Signifikanztests. 14 der 15 untersuchten Farbdifferenzen können unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL- 2° gegenüber den Normspektralwertfunktionen CIE1931 signifikant verringert werden. Unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006- 2° lassen sich 11 der 15 Farbdifferenzen gegenüber der Verwendung der Normspektralwertfunktionen re-

duzieren. Bei den Untersuchungen im 10°-Beobachterfeld können 11 der 15 Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° gegenüber den Normspektralwertfunktionen CIE1964 signifikant verringert werden. Unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-10° ist für 8 der 15 Farbdifferenzen gegenüber der Verwendung der Normspektralwertfunktionen eine signifikante Reduzierung möglich. Unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL können bei den Beobachtungen im 2°-Beobachterfeld 6 der 15 Farbdifferenzen gegenüber der Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006 signifikant verringert werden und im 10°-Beobachterfeld 5 der 15 Farbdifferenzen.

4.3.4 Diskussion

Ziel der Untersuchung der wahrgenommenen Farbdifferenzen an anderen Farbörtern war es herauszufinden, ob die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL für den gesamten Farbraum eine korrekte Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren auf denselben Farbort liefern. Es konnte gezeigt werden, dass die neuen Spektralwertfunktionen für alle untersuchten Kombinationen, aus spektralen Zusammensetzungen und untersuchten Farbörtern, Mediane an der Grenze der Wahrnehmungsschwelle liefern ($\Delta E_{sub} = 0.2$). Außerdem wurde nachgewiesen, dass die wahrgenommenen Farbdifferenzen unter der Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL im Gegensatz zu den Normspektralwertfunktionen für 14 der 15 untersuchten Farbdifferenzen im 2°-Beobachterfeld und für 11 der 15 untersuchten Farbdifferenzen im 10°-Beobachterfeld signifikant kleinere Werte aufwiesen. Damit wird durch diese Untersuchungsergebnisse die Hypothese gestützt, dass die Farbwahrnehmung im ganzen Farbraum durch die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL besser modelliert wird als mit den bisher von der CIE empfohlenen Spektralwertfunktionen CIE2006. Weitere Untersuchungen zur Farbwahrnehmung näher am Spektralfarbenzug sollten folgen, um dies genauer zu untersuchen.

4.4 Fazit: Neue Spektralwertfunktionen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen zielten darauf ab, zu testen, wie gut die Farbwahrnehmung bei der Verwendung von LED-Licht-

quellen mit den unterschiedlichen Spektralwertfunktionen modelliert wird. Zu diesem Zweck wurden Farbabgleichuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Spektralzusammensetzungen der Vergleichsspektren an unterschiedlichen Farbörtern untersucht. Zunächst wurde ermittelt, wie groß die Fehler bei der Abbildung visuell gleich wahrgenommener Spektren auf denselben Farbort unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 sind. Es stellte sich heraus, dass die Farbraumfehler stark abhängig von den Spektralverteilungen der verglichenen Spektren waren. Die Farbraumfehler zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren erreichten unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 maximal Werte von bis zu $\Delta u'v'_{K-Referenz} = 0,0165$. Beim Vergleich unterschiedlicher RGBW-Spektren, wie sie in der Praxis vorkommen, wurden mittlere Farbraumfehler von $\Delta u'v'_{K-Referenz} = 0,0100$ nachgewiesen. Diese Farbdifferenzen sind deutlich wahrnehmbar und führen in der praktischen Anwendung zu inakzeptablen Farbflecken. Die Hypothese, dass die größten Fehler in der Modellierung der Empfindlichkeitsfunktionen im Bereich niedriger Wellenlängen auftreten, konnte bestätigt werden. Die Farbraumfehler schlagen sich hauptsächlich in der v' -Koordinate nieder. Außerdem fallen die Farbraumfehler deutlich größer aus, wenn in einem Farbraum basierend auf Spektralwertfunktionen für einen 2° -Standardbeobachter die Abgleiche aus dem 10° -Beobachterfeld bewertet werden. Eine beobachterfeldgrößenspezifische Modellierung der Farbwahrnehmung ist demnach unerlässlich. In der Praxis ist es allerdings oft nicht möglich eine definierte Beobachterfeldgröße festzulegen, unter der die Spektren betrachtet werden. Das folgende Kapitel beschäftigt sich eingehend mit dieser Fragestellung.

Im weiteren Vorgehen wurden unterschiedliche Spektralwertfunktionen für 2° - und 10° -Standardbeobachter getestet. Zum Einsatz kamen neben den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 auch die Spektralwertfunktionen CIE2006- 2° und CIE2006- 10° , 2006-UP- 2° sowie 2006-TUIL- 2° und 2006-TUIL- 10° . Es stellte sich heraus, dass sowohl die Farbwahrnehmung im 2° - als auch im 10° -Beobachterfeld mit den neu entwickelten Spektralwertfunktionen 2006-TUIL, am besten modelliert werden kann. Die Farbraumfehler konnten unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL mit 95%iger Sicherheit auf Werte unter $\Delta u'v'_{K/G-Referenz} = 0,0040$, im Bereich der Wahrnehmungsschwelle, reduziert werden.

Um zu überprüfen, ob sich die Verringerung der Farbraumfehler tatsächlich auf die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen auswirkt, wurden Farbdifferenzbewertungen durchgeführt. Die Probanden bewerteten zwei Testfelder, deren Spektren mit Hilfe der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen auf denselben Farbort eingestellt wurden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte, dass die wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{sub} = 0..2$) reduziert werden konnten. Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen wurden die Farbdifferenzen dagegen als 'klein' bis 'deutlich' unterschiedlich ($\Delta E_{sub} = 4..6$) bewertet. Die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen konnten demnach unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL signifikant verringert werden.

In einer weiteren Versuchsreihe mit Farbdifferenzbewertungen wurde getestet, ob die Funktionen auch bei anderen Farbörtern unter Verwendung anderer Spektralzusammensetzungen ihre Gültigkeit beibehalten. Mit drei Versuchsszenarien wurden an fünf Farbörtern für gesättigte Lichtfarben Farbdifferenzbewertungen durchgeführt. Dabei wurden mit Hilfe der Spektralwertfunktionen der CIE sowie der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL die beiden Testfelder aneinander angepasst. Die Untersuchungen ergaben, dass auch für gesättigte Lichtfarben unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL die geringeren Farbdifferenzen wahrgenommen wurden. Damit konnte die Relevanz der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL für die Modellierung der Farbwahrnehmung von gesättigten Lichtfarben nachgewiesen werden.

Untersuchungsergebnisse von Fotios [FHC08] zu Bias-Effekten bei Helligkeitsuntersuchungen ließen vermuten, dass der Darstellungsort der Referenzlichtquelle Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse nehmen könnte. Daher wurde eine zweite Untersuchungsreihe durchgeführt, bei der die Referenzlichtquelle im unteren statt im oberen Testfeld dargeboten wurde. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass der Darstellungsort der Referenzlichtquelle keinen signifikanten Einfluss auf die Abgleichergebnisse hatte.

Die Untersuchungen zur Intra- und Interprobandenstreuung ergaben, dass die Interprobandenstreuung deutlich größer ist als die Intraprobandenstreuung. Die Achsenabschnitte der 95%-Ellipsen der Interbeobachterstreuung er-

reichten maximale Werte von $\Delta u'v' = 0,0300$. Bei allen Versuchsszenarien mit deutlichem Beobachterfeldgrößeneinfluss war die Interbeobachterstreuung in derselben Richtung wie die Farbortverschiebung, bedingt durch den Einfluss der Beobachterfeldgröße, besonders stark ausgeprägt. Die Achsenabschnitte der Streuungsellipsen der Intrabeobachterstreuung lagen zwischen $\Delta u'v' = 0,0020$ und $\Delta u'v' = 0,0040$. Größere Werte der Intrabeobachterstreuung bei Versuchsszenario VS7 lassen sich durch störende wahrgenommene Inhomogenitäten erklären, hervorgerufen durch die starken Spektraldifferenzen. Da die Interbeobachterstreuung auf Unterschiede in der Physiologie der einzelnen Beobachter zurückzuführen ist, sollte für Untersuchungen zur Wahrnehmungsschwelle die Intrabeobachterstreuung herangezogen werden. Damit liegen die hier ermittelten Wahrnehmungsschwellen im gleichen Wertebereich wie die von MacAdam [Mac42], Brown [Bro57] und Wyszecki [WF71] ermittelten Wahrnehmungsschwellen, die ebenfalls Werte zwischen $\Delta u'v' = 0,0020$ und $\Delta u'v' = 0,0040$ aufwiesen. Sowohl Interprobandenstreuung als auch Intraprobandenstreuung sind abhängig von der Spektralzusammensetzung der Vergleichsspektren. Bei Angaben von gerade wahrnehmbaren Farbdifferenzen muss demnach die Spektralzusammensetzung der Vergleichsspektren berücksichtigt werden. Je unterschiedlicher die Spektralzusammensetzungen der Vergleichsspektren sind, desto größer ist die Streuung zwischen den Probanden. Ist die Interbeobachterstreuung zu groß, ist es unmöglich eine farblich homogene Beleuchtung zu realisieren, die für alle Beobachter zufriedenstellend ist.

Bei Farbabgleichen zwischen Spektren stark unterschiedlicher Spektralzusammensetzungen wurden von den Probanden deutliche Inhomogenitäten der messtechnisch absolut homogenen Testflächen wahrgenommen. Dabei zeigte sich im mittleren Bereich der Trennlinie zwischen den beiden Testflächen ein Farbfleck, der die Gegenfarbe zur Farbe der restlichen Testfläche annahm. Wirkte die Testfläche leicht rötlich, wirkte der Fleck leicht grünlich. Auf der anderen Testfläche wurde der Eindruck genau umgekehrt wahrgenommen. Dieser Effekt ist zurückzuführen auf den Maxwell-Spot. Für die praktische Anwendung können sich daraus Probleme bei der farblich homogenen Beleuchtung größerer Flächen ergeben. So könnten Probleme durch deutlich wahrnehmbare Farbflecken bei der Verwendung unterschiedlicher LED-Spektren in der Beleuchtung von Flugzeugkabinen entstehen.

5 Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

Die Untersuchungen aus Kapitel 4 haben ergeben, dass es essentiell wichtig ist Spektralwertfunktionen zu verwenden, die für die untersuchte Beobachterfeldgröße ermittelt wurden. In der Realität ist es aber in der Regel unmöglich, eine definierte Beobachterfeldgröße festzulegen, unter der zwei Lichteinheiten betrachtet werden. Allein durch eine Änderungen der Entfernung des Beobachters zur beleuchteten Oberfläche und durch Änderungen des Winkels zur beobachteten Fläche variiert die Beobachterfeldgröße deutlich. In Kapitel 3.7 wurde am Beispiel der Flugzeugkabine beschrieben, dass die Beobachterfeldgröße, unter der zwei LED-Boards betrachtet werden, zwischen 2° und

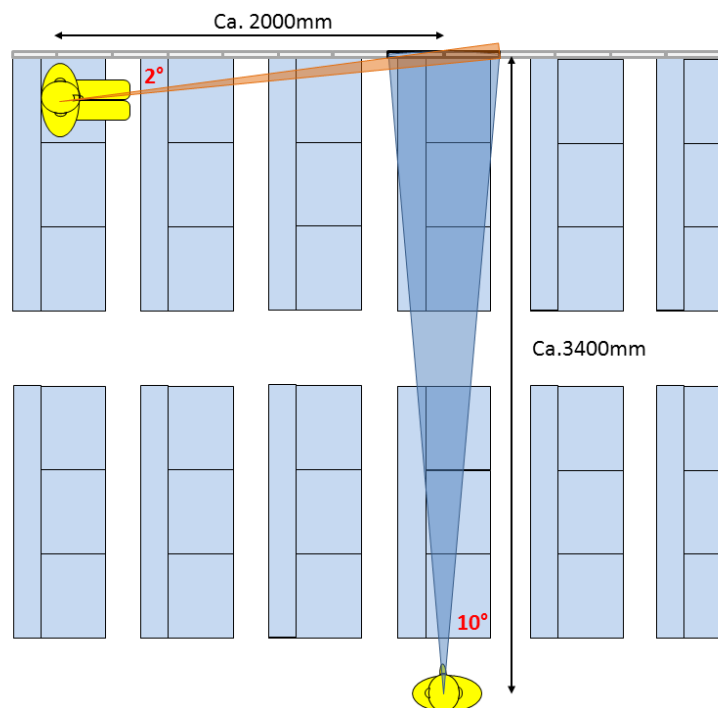


Abbildung 5.1 – Schematische Darstellung möglicher Betrachtungswinkel unter denen zwei Boards in der Flugzeugkabine beobachtet werden können.

10° schwanken kann. Abbildung 5.1 illustriert diese Problematik. Es gilt daher zu ermitteln, wie stark sich eine Änderung der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung metamerer Spektren auswirkt. Zunächst soll ermittelt werden, in welcher Größenordnung die Farbortverschiebungen bedingt durch eine Änderung der Beobachterfeldgröße liegen und wie dieser Einfluss von der spektralen Zusammensetzung der Vergleichsspektren abhängt. Außerdem stellt sich die Frage, ob sich einzelne Wellenlängenbereiche definieren lassen, in denen eine Differenz zwischen den beiden Vergleichsspektren einen besonders großen Einfluss auf eine Änderung der Farbwahrnehmung bedingt durch eine Beobachterfeldgrößenänderung hat. Ziel ist es, eine Maßzahl zu finden, die beschreibt, wie gut zwei Spektren dafür geeignet sind unabhängig von der Beobachterfeldgröße den gleichen Farbeindruck zu liefern.

5.1 Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung

Aus den Side-by-Side Abgleichversuchen aus Kapitel 4.1 lassen sich neben den bereits untersuchten Farbabständen zwischen Referenz- und Testlichtquelle auch die Farbdifferenzen zwischen den Abgleichergebnissen aus dem kleinen Beobachterfeld und den Abgleichergebnissen aus dem großen Be-

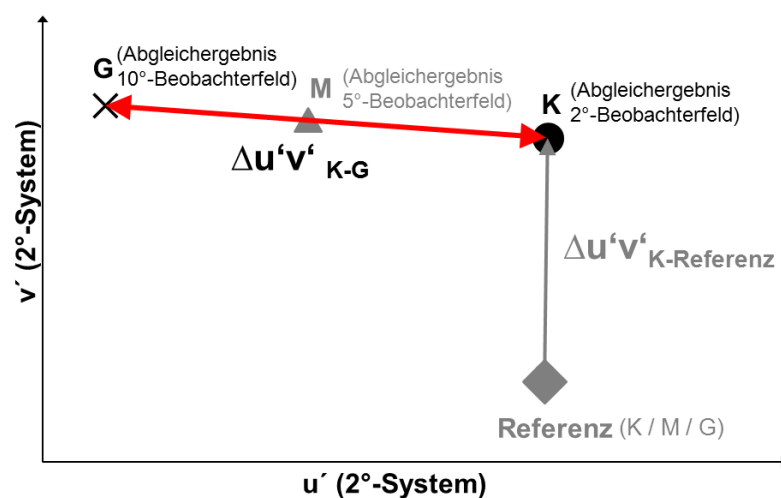


Abbildung 5.2 – Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{K-G}$

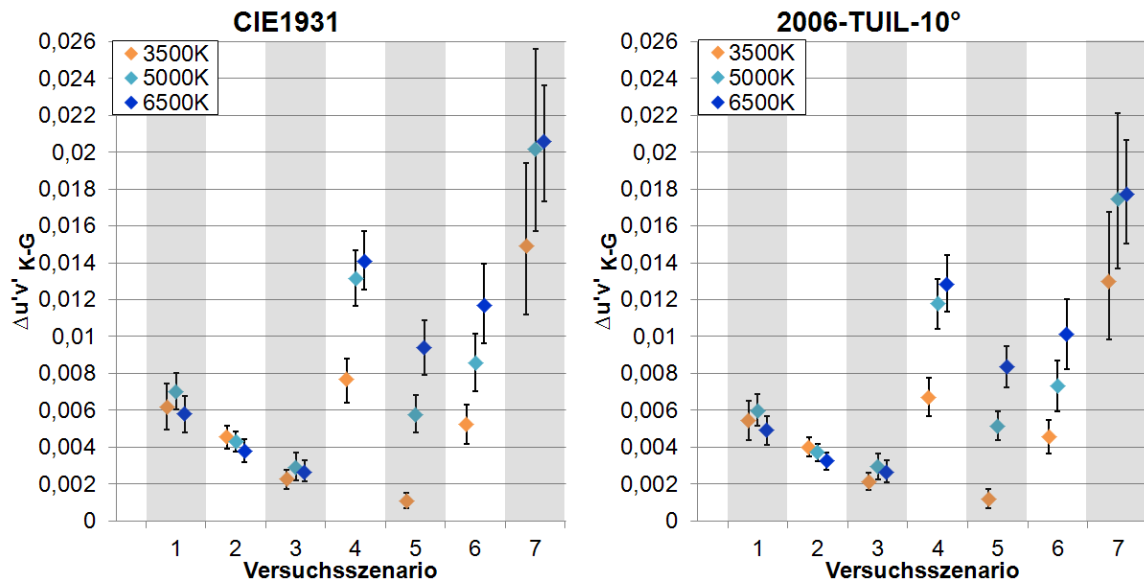


Abbildung 5.3 – Mittelwerte ($n=20$) und 95%-Konfidenzintervalle der Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K-G}$ für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 errechnet mit Hilfe der Normspektralwertfunktionen CIE1931 (links) und der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° (rechts).

obachterfeld ermitteln. $\Delta u'v'_{K-G}$ beschreibt den Farbabstand zwischen den Abgleichergebnissen K und den Abgleichergebnissen G (vgl. Abbildung 5.2). Ist dieser Farbabstand klein, ändert sich die Farberscheinung der beiden verglichenen Testspektren zueinander kaum, wenn sich die Beobachterfeldgröße ändert. Die beiden verglichenen Spektren eignen sich gut, um gemeinsam eine Fläche farblich homogen auszuleuchten, unabhängig davon, aus welcher Distanz und damit unter welcher Beobachterfeldgröße diese Fläche betrachtet wird. Die Auswertungen der Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K-G}$ in den verschiedenen Farbräumen, basierend auf den unterschiedlichen Spektralwertfunktionen, korrelieren stark, mit Korrelationskoeffizienten größer $r=0,99$. Für die Auswertung der Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K-G}$ sollen hier die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL verwendet werden, da die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass diese die Farbwahrnehmung am besten modellieren. Für die Berechnungen werden die Spektralwertfunktionen für einen 10°-Standardbeobachter herangezogen, da die Untersuchungen zur Validierung des Index (Kapitel 5.3) in einem 10°-Beobachterfeld durchgeführt wurden. Abbildung 5.3 zeigt die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K-G}$ für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 errechnet mit Hilfe der Normspektralwertfunktionen CIE1931 (links) und der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° (rechts). In Tabelle 5.1 sind die mittleren

Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K-G}$, ermittelt mit Hilfe der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen, aufgetragen. Es wird deutlich, dass die beobachterfeldgrößenabhängige Änderung der Farbwahrnehmung stark von den Differenzen der zu vergleichenden Spektren abhängt. Die Farbortverschiebungen sind für VS2 mit einer Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0040$ zwischen den zu vergleichenden Spektren zwar gering, liegen aber geringfügig über der Wahrnehmungsschwelle. Vergleicht man die Ergebnisse von Versuchsszenario VS1 mit VS3 so wird deutlich, dass die Farbortverschiebung von ca. $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0060$ bei VS1 durch das Auffüllen des Referenzspektrums bei 500 nm für VS3 auf Werte unter $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0030$ verringert werden kann. Daraus lässt sich schließen, dass sich durch gezielte Manipulationen an der Spektralzusammensetzung der Lichtquellen der Effekt der beobachterfeldgrößenabhängigen Farbortverschiebung verstärken oder verringern lässt. Der Farbabstand zwischen Abgleichergebnis K und Abgleichergebnis G ist bei VS2 größer als bei VS3, obwohl die Spektren bei Versuchsszenario VS3 augenscheinlich größere Differenzen aufweisen. Das bedeutet spektral deutlich unterschiedliche Spektren müssen nicht immer zu einem großen $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)}$ -Wert führen. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass abhängig vom Wellenlängenbereich, in dem Differenzen zwischen den Spektren auftreten, unterschiedlich starke Verschiebungen zwischen den Abgleichergebnissen K und G auftreten. Die spektrale Abhängigkeit der resultierenden Farbortverschiebung bedingt durch eine Änderung der Beobachterfeldgröße wird in Kapitel 5.2.2 genauer untersucht. Bei den Versuchsszenarien VS4 bis VS6 fällt auf, dass sich die beobachterfeldgrößenabhängige Farbortverschiebung mit steigender Farbtemperatur vergrößert (vgl. Abbildung 5.3). Dies lässt wiederum vermuten, dass ein erhöhter Spektralwertanteil im Bereich kurzer Wellenlängen den Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung verstärkt. Bei Versuchsszenario VS7 mit zueinander versetzten Maxima der Vergleichsspektren hat die Beobachterfeldgröße den größten Einfluss auf die Farbwahrnehmung. Die Farbortverschiebung erreicht bei diesem Versuchsszenario Werte von $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)} = 0,0200$. Hiermit wurde gezeigt, dass allein eine Beobachterfeldgrößenänderung einen deutlichen Farbunterschied zwischen zwei vormals metameren Testlichtfeldern hervorrufen kann. Daher ist es für die praktische Anwendung notwen-

dig, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Vorhersage für den Einfluss der Beobachterfeldgröße für ein gegebenes System aus RGBW-LEDs ermöglicht.

Tabelle 5.1 – Mittelwerte ($n=20$) der Farbabstände $\Delta u'v'_{K-G}$, ermittelt mit Hilfe des Boot-Strap-Verfahrens und dazugehörige 1,96fache Standardabweichungen für die einzelnen Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K. Die Farbabstände variieren stark, abhängig von der spektralen Differenz zwischen Referenz- und Testspektrum; ebenso die Streuung.

| Versuchsszenario | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3500 K | | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)}$ | 0,0062 | 0,0046 | 0,0023 | 0,0077 | 0,0011 | 0,0052 | 0,0149 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)})$ | 0,0012 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0012 | 0,0004 | 0,0011 | 0,0041 |
| $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-2^\circ)}$ | 0,0060 | 0,0043 | 0,0020 | 0,0073 | 0,0012 | 0,0048 | 0,0140 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-2^\circ)})$ | 0,0012 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0006 | 0,0010 | 0,0038 |
| $\Delta u'v'_{K-G(CIE1964)}$ | 0,0055 | 0,0040 | 0,0022 | 0,0068 | 0,0010 | 0,0046 | 0,0133 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(CIE1964)})$ | 0,0011 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0004 | 0,0009 | 0,0037 |
| $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)}$ | 0,0054 | 0,0040 | 0,0021 | 0,0067 | 0,0012 | 0,0046 | 0,0130 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)})$ | 0,0011 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0005 | 0,0009 | 0,0034 |
| 5000 K | | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)}$ | 0,0070 | 0,0043 | 0,0029 | 0,0131 | 0,0057 | 0,0086 | 0,0202 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)})$ | 0,0010 | 0,0006 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0010 | 0,0015 | 0,0048 |
| $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-2^\circ)}$ | 0,0068 | 0,0041 | 0,0029 | 0,0126 | 0,0056 | 0,0080 | 0,0187 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-2^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0009 | 0,0014 | 0,0042 |
| $\Delta u'v'_{K-G(CIE1964)}$ | 0,0061 | 0,0038 | 0,0029 | 0,0119 | 0,0051 | 0,0075 | 0,0177 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(CIE1964)})$ | 0,0008 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0014 | 0,0041 |
| $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)}$ | 0,0060 | 0,0037 | 0,0029 | 0,0118 | 0,0052 | 0,0073 | 0,0175 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0014 | 0,0042 |
| 6500 K | | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)}$ | 0,0058 | 0,0038 | 0,0027 | 0,0141 | 0,0094 | 0,0117 | 0,0206 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(CIE1931)})$ | 0,0010 | 0,0006 | 0,0006 | 0,0016 | 0,0015 | 0,0022 | 0,0032 |
| $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-2^\circ)}$ | 0,0057 | 0,0036 | 0,0027 | 0,0136 | 0,0089 | 0,0110 | 0,0192 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-2^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0006 | 0,0006 | 0,0017 | 0,0012 | 0,0021 | 0,0029 |
| $\Delta u'v'_{K-G(CIE1964)}$ | 0,0050 | 0,0033 | 0,0026 | 0,0129 | 0,0084 | 0,0103 | 0,0180 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(CIE1964)})$ | 0,0008 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0015 | 0,0012 | 0,0020 | 0,0028 |
| $\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)}$ | 0,0049 | 0,0032 | 0,0026 | 0,0128 | 0,0084 | 0,0101 | 0,0177 |
| $1,96 * \sigma(\Delta u'v'_{K-G(2006-TUILL-10^\circ)})$ | 0,0008 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0015 | 0,0011 | 0,0019 | 0,0028 |

5.2 Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

Mit Hilfe von Spektralwertfunktionen, die die Farbwahrnehmung des Auges exakt modellieren, lässt sich die resultierende Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K-G}$ ohne Farbabgleiche ermitteln. Diese Farbdifferenz kann als Index für die Empfindlichkeit metamerer Spektren auf eine Beobachterfeldgrößenänderungen gewertet werden. Dieser Index wird in der vorliegenden Arbeit als Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit (kurz: MIB) eingeführt. Im Folgenden werden zwei Methoden zur rechnerischen Ermittlung dieses Index erläutert. Da die Ermittlung des Index in der Praxis besonders relevant für den Vergleich unterschiedlicher RGBW-LED-Systeme ist, soll die Berechnung anhand des Vergleichs zweier RGBW-Systeme vorgestellt werden. Ziel ist es, mit diesen Rechenverfahren die Kompatibilität zweier LED-Systeme für die gemeinsame Anwendung in großflächigen Beleuchtungssituationen vorab ermitteln zu können.

5.2.1 Direkte Berechnung

Grundvoraussetzung für die Ermittlung des Einflusses der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung sind zwei Sätze Spektralwertfunktionen für die Beobachterfeldgrößen, zwischen denen der Einflussfaktor ermittelt werden soll. Diese müssen die Farbwahrnehmung des Auges für die definierte Beobachterfeldgröße korrekt modellieren. Da sich in Kapitel 4 die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10° als die geeignetsten Modellierungsfunktionen für die Farbwahrnehmung im 2°- und 10°-Beobachterfeld herausgestellt haben, kommen diese hier zum Einsatz. Abbildung 5.4 veranschaulicht schematisch die Rechenschritte zur Ermittlung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit für den Wechsel von einem 2°- auf ein 10°-Beobachterfeld. Als Eingabeparameter für die Berechnung des Index werden die Spektren der einzelnen LEDs der RGBW-LED-Systeme benötigt. Zudem wird festgelegt, für welchen Farbort die Kompatibilität der beiden RGBW-LED-Systeme überprüft werden soll. Dieser Farbort wird POI ('Point of Interest') genannt. Mit den beiden zu vergleichenden RGBW-LED-Systemen lassen sich innerhalb eines definierten Gamutbereichs mit Hilfe des

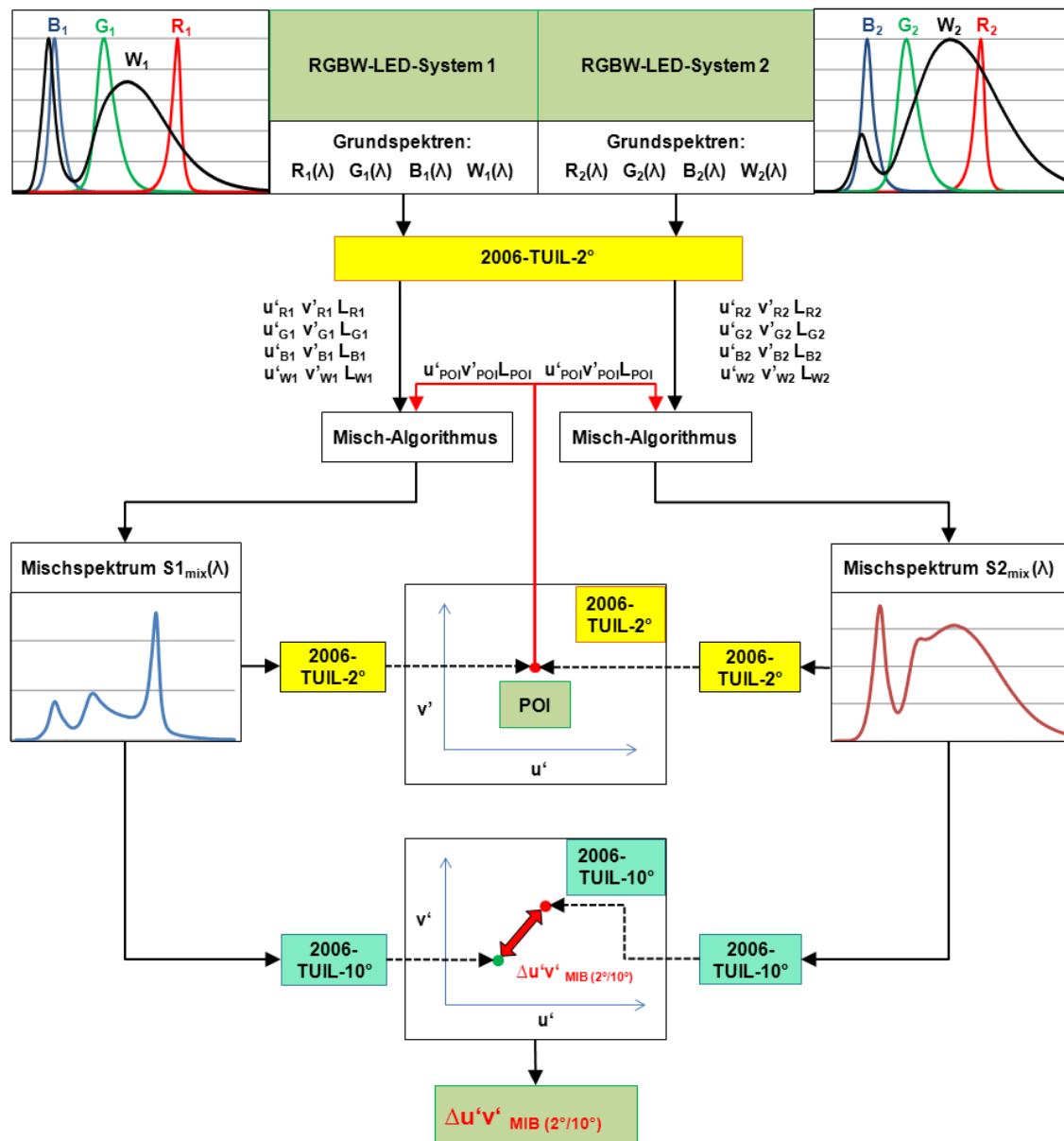


Abbildung 5.4 – Schematische Darstellung des Rechenwegs zur Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Zuerst werden für die einzelnen LED-Grundspektren der beiden zu vergleichenden RGBW-Systeme die Farbkoordinaten $u^i v^i$ mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-2° und die maximale Leuchtdichte der Einzelkomponenten ermittelt. Mit Hilfe eines Farbmischalgorithmus werden dann die Verhältnisse ermittelt, in denen die einzelnen LEDs angesteuert werden müssen, damit das Mischspektrum denselben Farbwert im $u^i v^i$ -Diagramm 2006-TUILL-2° besitzt wie der Point of Interest und die gewünschte Leuchtdichte. Die beiden Mischspektren $S1_{mix}(\lambda)$ und $S2_{mix}(\lambda)$ stellen ein metameres Paar, in Bezug auf die Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-2°, dar. Berechnet man nun die Farbörter dieser beiden Spektren mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-10°, entspricht die resultierende Farbdifferenz zwischen den beiden Spektren dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit.

in Kapitel 3.3.5 beschriebenen Mischalgorithmus alle Farbbörter einstellen. Als Eingangsparameter für den Mischalgorithmus werden die Farbkoordinaten der einzelnen LEDs der beiden LED-Systeme mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-2° errechnet. Mit dem Algorithmus wird ermittelt, in welchem Mischverhältnis die LEDs der beiden Systeme angesteuert werden müssen, damit die Mischspektren den gewünschten Farbbort (POI) aufweisen. Die beiden resultierenden Mischspektren $S1_{mix}(\lambda)$ und $S2_{mix}(\lambda)$ liefern unter Beobachtung im 2°-Beobachterfeld denselben Farbeindruck. Berechnet man nun die Farbbörter dieser beiden Mischspektren mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-10° erhält man den Farbabstand $\Delta u'v'_{MIB}$. Dieser beschreibt die Farbdifferenz, die zwischen den vormals metameren Spektren wahrgenommen würde, wenn sich die Beobachterfeldgröße, unter der diese beiden beobachtet werden, ändert. Je größer diese Farbdifferenz ist, desto stärker ist der Effekt der Beobachterfeldgrößenänderung auf die Farbwahrnehmung zwischen diesen beiden Spektren. Daher kann dieser Farbabstand direkt mit einem Index gleichgesetzt werden, der beschreibt, wie gut die beiden Spektren dazu geeignet sind ihre Metamerie unabhängig von der Beobachterfeldgröße beizubehalten.

5.2.2 Berechnung über Differenzspektrum

Das Ziel der Untersuchungen bestand darin zu ermitteln, in welchen Wellenlängenbereichen Differenzen zwischen den beiden zu vergleichenden Spektren zu besonders großen Farbbortverschiebungen, bedingt durch eine Änderung der Beobachterfeldgröße, führen. Die Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit über das Differenzspektrum ermöglicht ein besseres Verständnis dieses Zusammenhangs.

Für die Berechnung über das Differenzspektrum werden zunächst für beide RGBW-LED-Systeme die Mischspektren $S1_{mix}(\lambda)$ und $S2_{mix}(\lambda)$ ermittelt, die für ein 2°-Beobachterfeld auf den POI abgebildet werden. Sie bilden für ein 2°-Beobachterfeld ein metameres Spektrenpaar. Die Berechnung dieser Mischspektren wurde bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben und wird hier daher nicht genauer ausgeführt. Auf Grundlage des Farbborts des Mischspektrums $S1_{mix}(\lambda)$ im $u'v'$ -Diagramm, basierend auf den Spektralwertfunktionen 2006-TUILL-10°, werden die spektralen 'Änderungs-Empfindlichkeits-

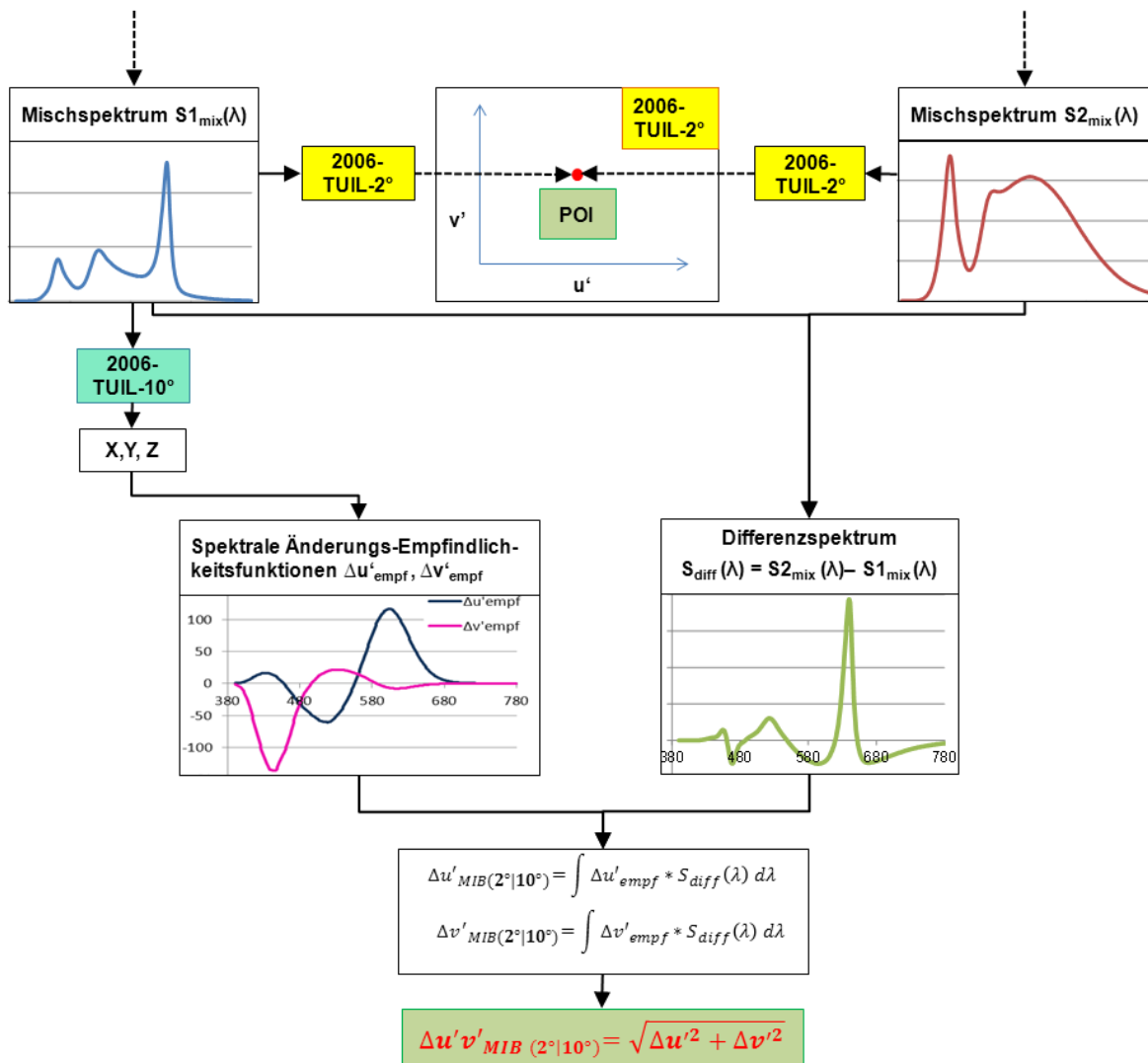


Abbildung 5.5 – Schematische Darstellung des Rechenwegs zur Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit über das Differenzspektrum. Die beiden Mischspektren $S1_{mix}(\lambda)$ und $S2_{mix}(\lambda)$ stellen ein metameres Paar in Bezug auf die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° dar. Auf Basis der Farbkoordinaten des Mischspektrums $S1_{mix}(\lambda)$ im $u'v'$ -Diagramm, basierend auf den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10°, werden die spektralen 'Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen' $\Delta u'_{empf}(\lambda)$ und $\Delta v'_{empf}(\lambda)$ ermittelt. Diese Funktionen beschreiben, wie stark sich spektrale Differenzen der beiden zu vergleichenden Spektren in einer u' - oder v' -Verschiebung niederschlagen werden. Um mit Hilfe dieser Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen den Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit zu ermitteln, werden die beiden Funktionen jeweils wellenlängenweise mit dem Differenzspektrum multipliziert und das Integral gebildet.

funktionen' $\Delta u'_{empf}(\lambda)$ und $\Delta v'_{empf}(\lambda)$ ermittelt. Diese Funktionen beschreiben, wie stark sich spektrale Differenzen der beiden zu vergleichenden Spektren in einer u' - oder v' -Verschiebung im 10°-System niederschlagen werden. Die Berechnung dieser Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen wird im Folgen-

den am Beispiel der u' -Komponente beschrieben. Die Berechnung der v' -Komponente funktioniert analog. Alle im folgenden dargelegten Formeln verwenden lediglich die allgemeinen Bezeichnungen u' , v' , X , Y , Z , $\bar{x}_{10^\circ}(\lambda)$, $\bar{y}_{10^\circ}(\lambda)$ und $\bar{z}_{10^\circ}(\lambda)$. In dem in Abbildung 5.5 dargestellten Berechnungsschema würde hierfür immer der entsprechende Zusatz 2006-TUIL-10° eingefügt werden. Die Funktionen sind aber allgemeingültig und lassen sich für jeden Satz Spektralwertfunktionen verwenden. Zunächst wird in Gleichung 5.1 mit Hilfe der partiellen Ableitung ermittelt wie stark sich Änderungen in den Spektralwerten X , Y und Z auf die u' -Koordinate auswirken.

$$\Delta u' = \frac{\partial u'}{\partial X} * \Delta X + \frac{\partial u'}{\partial Y} * \Delta Y + \frac{\partial u'}{\partial Z} * \Delta Z \quad (5.1)$$

Mit

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (5.2)$$

ergibt sich für die partiellen Ableitungen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial X} &= \frac{60Y + 12Z}{(X + 15Y + 3Z)^2} \\ \frac{\partial u'}{\partial Y} &= \frac{-60X}{(X + 15Y + 3Z)^2} \\ \frac{\partial u'}{\partial Z} &= \frac{-12X}{(X + 15Y + 3Z)^2} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Zudem gilt:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) * S2_{\text{mix}}(\lambda) d\lambda - \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) * S1_{\text{mix}}(\lambda) d\lambda \\ &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) * (S2_{\text{mix}}(\lambda) - S1_{\text{mix}}(\lambda)) d\lambda \\ &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) * (S_{\text{diff}}(\lambda)) d\lambda \\ \Delta Y &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{y}_{10^\circ}(\lambda) * (S_{\text{diff}}(\lambda)) d\lambda \\ \Delta Z &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{z}_{10^\circ}(\lambda) * (S_{\text{diff}}(\lambda)) d\lambda \end{aligned} \quad (5.4)$$

Setzt man die Gleichungen 5.3 und 5.4 nun in Gleichung 5.1 ein, so lässt sich $\Delta u'$ wie folgt darstellen:

$$\Delta u' = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \frac{1}{(X + 15Y + 3Z)^2} \cdot [(60Y + 12Z) \cdot \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) + (-60X) \cdot \bar{y}_{10^\circ}(\lambda) + (-12X) \cdot \bar{z}_{10^\circ}(\lambda)] \cdot S_{diff}(\lambda) d\lambda \quad (5.5)$$

Für die spektrale Empfindlichkeit der u' -Änderung auf Spektraldifferenzen zwischen den zu vergleichenden Spektren, $\Delta u'_{empf}(\lambda)$, ergibt sich daher:

$$\Delta u'_{empf}(\lambda) = \frac{1}{(X + 15Y + 3Z)^2} \cdot [(60Y + 12Z) \cdot \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) + (-60X) \cdot \bar{y}_{10^\circ}(\lambda) + (-12X) \cdot \bar{z}_{10^\circ}(\lambda)] \quad (5.6)$$

Analog lässt sich die spektrale Empfindlichkeit der v' -Änderung auf Spektraldifferenzen zwischen den zu vergleichenden Spektren, $\Delta v'_{empf}(\lambda)$, errechnen:

$$\Delta v'_{empf}(\lambda) = \frac{1}{(X + 15Y + 3Z)^2} \cdot [(-9Y) \cdot \bar{x}_{10^\circ}(\lambda) + (9X + 27Z) \cdot \bar{y}_{10^\circ}(\lambda) + (-27Y) \cdot \bar{z}_{10^\circ}(\lambda)] \quad (5.7)$$

Sind die spektralen Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen $\Delta u'_{empf}(\lambda)$ und $\Delta v'_{empf}(\lambda)$ einmal für einen bestimmten Farbort bei einer definierten Helligkeit in einem Farbraum bestimmt, sind sie unter diesen Bedingungen allgemein gültig. Abbildung 5.6 zeigt exemplarisch die relativen spektralen Änderungs-Empfindlichkeiten

$\Delta u'_{empf(2006-TUILL-10^\circ)}(\lambda)$ und $\Delta v'_{empf(2006-TUILL-10^\circ)}(\lambda)$ für die Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K. Es wird deutlich, dass einige Wellenlängenbereiche ausschlaggebender für eine Verschiebung der Farbkoordinaten sind als andere. Beide Funktionen haben einen negativen Peak im Bereich kürzerer Wellenlängen und einen positiven Peak im Bereich größerer Wellenlängen. Die Grundform der Funktionen ist ähnlich, obwohl die Verhältnisse der negativen und positiven Anteile sich deutlich unterscheiden. Die Empfindlichkeitsfunktion $\Delta u'_{empf}(\lambda)$ für eine Änderung der u' -Komponente ist im Vergleich zur Änderungs-Empfindlichkeitsfunktion $\Delta v'_{empf}(\lambda)$ deutlich zu größeren Wel-

lenlängenbereichen hin verschoben. Die Peakwellenlängen der u' -Empfindlichkeitsfunktionen liegen bei $\lambda_{Peak-neg} = 520 \text{ nm}$ und $\lambda_{Peak-pos} = 610 \text{ nm}$ während sie für die v' -Empfindlichkeitsfunktion bei $\lambda_{Peak-neg} = 440 \text{ nm}$ und $\lambda_{Peak-pos} = 545 \text{ nm}$ liegen. Die Empfindlichkeiten nehmen bei beiden Funktionen mit zunehmender Farbtemperatur in den größeren Wellenlängenbereichen zu. Durch die Vorzeichenwechsel der Empfindlichkeitsfunktionen können die Auswirkungen deutlicher Änderungen im Gesamtspektrum ausgelöscht werden. Daher ist es unabdingbar immer das gesamte Spektrum in die Betrachtungen einzubeziehen. Die Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen beziehen sich allgemein auf die Auswirkungen der wellenlängenabhängigen Änderung eines Spektrums, das im untersuchten 10° -System den beschriebenen Farbort besitzt. Daher sind die Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen über das gesamte Spektrum ausgedehnt und sind nicht entspre-

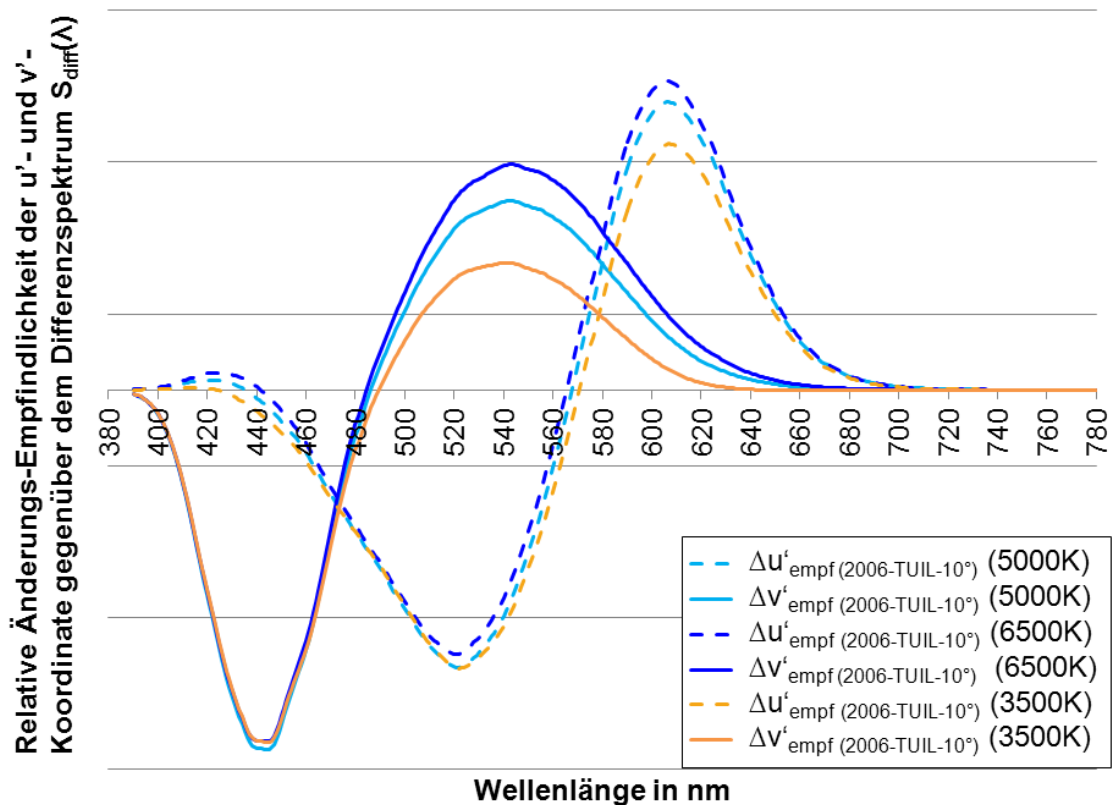


Abbildung 5.6 – Relative spektrale Änderungsempfindlichkeiten $\Delta u'_{empf}(\lambda)$ und $\Delta v'_{empf}(\lambda)$ der u' - und v' -Koordinate für Änderungen im Spektrum bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K im Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL- 10° .

chend des spektralen Einflusses des Makulapigments auf kurzwellige Spektralbereiche begrenzt. Der Bezug zum Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung ergibt sich erst durch das Differenzspektrum der beiden Mischspektren, welche im 2°-System ein metameres Paar bilden.

Um mit Hilfe dieser Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen den Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit zu ermitteln, werden die beiden Funktionen jeweils wellenlängenweise mit dem Differenzspektrum multipliziert und das Integral berechnet. Aus den resultierenden $\Delta u'$ und $\Delta v'$ -Werten wird nach Gleichung 5.9 der Farbabstand $\Delta u'v'_{MIB}$ ermittelt, der dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit entspricht.

$$\begin{aligned}\Delta u'_{MIB} &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Delta u'_{empf}(\lambda) * S_{diff}(\lambda) d\lambda \\ \Delta v'_{MIB} &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Delta v'_{empf}(\lambda) * S_{diff}(\lambda) d\lambda\end{aligned}\quad (5.8)$$

$$\Delta u'v'_{MIB} = \sqrt{\Delta u'^2_{MIB} + \Delta v'^2_{MIB}} \quad (5.9)$$

In Tabelle 5.2 sind die Metamerie-Indizes für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit $u'v'_{MIB}$ für alle Kombinationen, der in dieser Arbeit verwendeten Testlichtquellen, dargestellt. Für die untersuchten Spektralwertfunktionen ergibt sich ein maximaler Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit von $u'v'_{MIB} = 0,0262$. Es lässt sich kein systematischer Zusammenhang zwischen der Farbtemperatur und dem untersuchten Metamerie-Index erkennen. Die Ergebnisse zeigen, dass es notwendig ist, die beiden zu vergleichenden LED-Systeme an allen relevanten Farbörtern auf ihre Kompatibilität zu überprüfen. Es kann sein, dass zwei LED-Systeme, die an einem Farbort kompatibel sind, bei einem anderen Farbort stark auf eine Beobachterfeldgrößenänderung reagieren.

Tabelle 5.2 – $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ/10^\circ)}$ -Werte für einen Beobachterfeldgrößenwechsel von 2° auf 10° für alle Kombinationen der verwendeten Testlichtquellen für die Farbörter bei 3500 K, 5000 K und 6500 K.

| | TLR-RGBW | TLR-RGB | TLR-RGBW+C | TLR+Cyan-RCBW | TLG-RGBW | TLG-RGB | 8-LED-Vollspektrum | ACB-Mix | RCBW-Mix |
|---------------|----------|---------|------------|---------------|----------|---------|--------------------|---------|----------|
| 3500 K | | | | | | | | | |
| TLR-RGBW | 0,0000 | 0,0045 | 0,0067 | 0,0238 | 0,0063 | 0,0094 | 0,0060 | 0,0160 | 0,0036 |
| TLR-RGB | 0,0045 | 0,0000 | 0,0034 | 0,0199 | 0,0026 | 0,0051 | 0,0032 | 0,0116 | 0,0026 |
| TLR-RGBW+C | 0,0067 | 0,0034 | 0,0000 | 0,0159 | 0,0009 | 0,0036 | - | 0,0085 | 0,0030 |
| TLR+Cyan-RCBW | 0,0238 | 0,0199 | 0,0159 | 0,0000 | 0,0176 | 0,0150 | 0,0262 | 0,0092 | 0,0202 |
| TLG-RGBW | 0,0063 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0176 | 0,0000 | 0,0033 | 0,0011 | 0,0090 | 0,0030 |
| TLG-RGB | 0,0094 | 0,0051 | 0,0036 | 0,0150 | 0,0033 | 0,0000 | 0,0038 | 0,0074 | 0,0062 |
| 8-LED-Vollsp. | 0,0060 | 0,0032 | - | 0,0262 | 0,0011 | 0,0038 | 0,0000 | 0,0085 | 0,0029 |
| ACB-Mix | 0,0160 | 0,0116 | 0,0085 | 0,0092 | 0,0090 | 0,0074 | 0,0085 | 0,0000 | 0,0113 |
| RCBW-Mix | 0,0036 | 0,0026 | 0,0030 | 0,0202 | 0,0030 | 0,0062 | 0,0029 | 0,0113 | 0,0000 |
| 5000 K | | | | | | | | | |
| TLR-RGBW | 0,0000 | 0,0062 | 0,0065 | 0,0004 | 0,0067 | 0,0111 | 0,0126 | 0,0222 | 0,0136 |
| TLR-RGB | 0,0062 | 0,0000 | 0,0032 | 0,0059 | 0,0025 | 0,0051 | 0,0077 | 0,0175 | 0,0089 |
| TLR-RGBW+C | 0,0065 | 0,0032 | 0,0000 | 0,0065 | 0,0009 | 0,0053 | - | 0,0156 | 0,0067 |
| TLR+Cyan-RCBW | 0,0004 | 0,0059 | 0,0065 | 0,0000 | 0,0063 | 0,0107 | 0,0093 | 0,0218 | 0,0131 |
| TLG-RGBW | 0,0067 | 0,0025 | 0,0009 | 0,0063 | 0,0000 | 0,0048 | 0,0060 | 0,0158 | 0,0070 |
| TLG-RGB | 0,0111 | 0,0051 | 0,0053 | 0,0107 | 0,0048 | 0,0000 | 0,0039 | 0,0130 | 0,0050 |
| 8-LED-Vollsp. | 0,0126 | 0,0077 | - | 0,0093 | 0,0060 | 0,0039 | 0,0000 | 0,0093 | 0,0006 |
| ACB-Mix | 0,0222 | 0,0175 | 0,0156 | 0,0218 | 0,0158 | 0,0130 | 0,0093 | 0,0000 | 0,0088 |
| RCBW-Mix | 0,0136 | 0,0089 | 0,0067 | 0,0131 | 0,0070 | 0,0050 | 0,0006 | 0,0088 | 0,0000 |
| 6500 K | | | | | | | | | |
| TLR-RGBW | 0,0000 | 0,0050 | 0,0054 | 0,0037 | 0,0057 | 0,0098 | 0,0150 | 0,0241 | 0,0165 |
| TLR-RGB | 0,0050 | 0,0000 | 0,0033 | 0,0032 | 0,0027 | 0,0050 | 0,0110 | 0,0205 | 0,0128 |
| TLR-RGBW+C | 0,0054 | 0,0033 | 0,0000 | 0,0025 | 0,0010 | 0,0055 | - | 0,0185 | 0,0106 |
| TLR+Cyan-RCBW | 0,0037 | 0,0032 | 0,0025 | 0,0000 | 0,0022 | 0,0068 | 0,0114 | 0,0204 | 0,0128 |
| TLG-RGBW | 0,0057 | 0,0027 | 0,0010 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0047 | 0,0092 | 0,0186 | 0,0109 |
| TLG-RGB | 0,0098 | 0,0050 | 0,0055 | 0,0068 | 0,0047 | 0,0000 | 0,0066 | 0,0160 | 0,0085 |
| 8-LED-Vollsp. | 0,0150 | 0,0110 | - | 0,0114 | 0,0092 | 0,0066 | 0,0000 | 0,0088 | 0,0010 |
| ACB-Mix | 0,0241 | 0,0205 | 0,0185 | 0,0204 | 0,0186 | 0,0160 | 0,0088 | 0,0000 | 0,0077 |
| RCBW-Mix | 0,0165 | 0,0128 | 0,0106 | 0,0128 | 0,0109 | 0,0085 | 0,0010 | 0,0077 | 0,0000 |

5.2.3 Diskussion - Interpretation des Index

Die Idee zur Anwendung eines Index, der beschreibt wie stark ein einzelner Einfluss die Metamerie eines bestimmten metameren Paares stört, ist nicht neu. In Kapitel 2.7 wurden bereits die von der CIE anerkannte speziellen Meta-

merie-Indizes beschrieben. Der hier beschriebene Index basiert auf derselben Idee wie der Metamerie-Index für einen Wechsel des Beobachters. Allerdings wird hier zum einen nicht die Streuung des Beobachters untersucht, sondern der Wechsel von einem 2°-Beobachter auf einen 10°-Beobachter. Zum anderen wird statt des Farbabstandes ΔE im CIE-L*a*b*-Farbraum die Farbdifferenz in der UCS-u'v'-Farbtafel berechnet.

Im Jahre 1959 stellte Wyszecki [Wys59] bereits theoretische Überlegungen dazu an, wie sich ein Wechsel von 2°- zu 10°-Beobachterfunktionen auf metamere Spektren auswirken würde. Er ermittelte mit Hilfe von 108 rechnerisch generierten, metameren Reflexionsspektren (unter Verwendung der Bezugslichtart C) ein Abweichungsellipsoid, dass sich ergeben würde, wenn diese, für den 2°-Standardbeobachter, metameren Spektren mit dem 10°-Standardbeobachter von Stiles [SB59] bewertet würden. Die sich daraus für eine konstante Leuchtdichte ergebende Ellipse hat ihre größte Ausdehnung analog zu den Farbortverschiebungen $\Delta u'v'_{K-G}$ aus den Abgleichuntersuchungen in der Rot-Grün Achse [Wys59]. Die Abweichungen waren bei ungesättigten Farben am größten und nahmen ab, je gesättigter die Farben wurden. Im Unbuntpunkt des xy-Diagramms erreichte die größere Halbachse der Ellipse ein Ausmaß von $\Delta xy = 0,0124$ ($\hat{=} \Delta u'v' = 0,0100$) [Wys59]. Dies liegt in etwa in der Größenordnung der größten Abweichung der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Versuchsszenarien. Es ist interessant, dass die Überlegungen von damals lediglich zur Veranschaulichung mit den beiden unterschiedlichen Sätzen der Normspektralwertfunktionen durchgeführt wurden. Eine praktische Anwendung dieser Berechnungen wurde zum damaligen Zeitpunkt nicht gesehen ([WS00] (S.187)). Heute besitzt dieser Index größte Relevanz, denkt man an Anwendungen der Display- und Leinwandbeleuchtung, Media-Walls und nicht zu vergessen farblich homogene Ausleuchtungen von großen Flächen mit Hilfe von LEDs, wie im Anwendungsbeispiel der Flugzeugkabinenbeleuchtung.

Mit Hilfe des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit lässt sich für jeden beliebigen Farbort vorab bestimmen, in welchem Maß metamere Spektren ihre Farberscheinung zueinander ändern werden, wenn sich die Beobachterfeldgröße ändert. Damit lassen sich unterschiedliche LED-Systeme auf ihre Kompatibilität zur Verwendung in einer gemeinsamen Beleuchtungsapplikation untersuchen. Je größer der ermittelte Indexwert ist, desto

schlechter sind die beiden LED-Systeme kompatibel; desto stärker werden die Farbflecken ausgeprägt sein, die sich bei einem Wechsel der Beobachterfeldgröße ergeben. Um aus dem eingeführten Index sinnvolle Aussagen über die Kompatibilität der verglichenen LED-Systeme ziehen zu können, müssen Kategorien für die Indexwerte ermittelt werden, die eine einfache Einschätzung der Kompatibilitätsfähigkeit ermöglichen. Das folgende Kapitel beschäftigt sich unter anderem mit dieser Fragestellung, kann aber keine vollständige Antwort liefern. Weitere Untersuchungen zu Akzeptanzkategorien sollten folgen.

Mit der Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit über das Differenzspektrum ist es gelungen, die Wellenlängenabhängigkeit des Index von Spektraldifferenzen der zu vergleichenden Spektren zu visualisieren. Es wird damit deutlich, dass es nicht möglich ist, die Betrachtungen auf einzelne, besonders ausschlaggebende Wellenlängenbereiche zu reduzieren. Obwohl Spektraldifferenzen in bestimmten Wellenlängenbereichen besonders starken Einfluss auf die Farbwahrnehmung nehmen, muss immer der gesamte Spektralbereich in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Die Berechnung über das Differenzspektrum macht weiterhin deutlich, dass einzig und allein das Differenzspektrum zwischen den beiden Spektren für die Farbortverschiebung bedingt durch eine Beobachterfeldgrößenänderung verantwortlich ist. Die Grundform der Spektren, ob sehr kontinuierlich oder mit starken Steigungen und Absenkungen versehen, ist nicht von Bedeutung. Da die spektralen Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen ihr Vorzeichen wechseln, wird deutlich, dass nicht alle Spektren mit deutlich unterschiedlichen Spektralverteilungen auch stark auf einen Beobachterfeldwechsel reagieren müssen.

Wollte man den Index analog zu den bestehenden Indizes ermitteln, müsste man den resultierenden Helligkeitsunterschied in die Betrachtungen mit einbeziehen. Allerdings wurden alle in dieser Arbeit angestellten Betrachtungen lediglich im $u'v'$ -Farbraum vorgenommen und Leuchtdichteunterschiede vorerst nicht in die Betrachtungen einbezogen. Alle Untersuchungen wurden bei derselben Leuchtdichte ausgeführt. Daher bleiben alle hier hergestellten Zusammenhänge auch unter Betrachtung der Leuchtdichte weitestgehend bestehen. Sobald ein Farbraum existiert, der auf Basis korrekter Spektralwertfunktionen in Zusammenhang mit einer korrekten Hellempfindlichkeits-

funktion arbeitet, sollte der Index auf die Farbdifferenzermittlung mit diesem Farbraum angepasst werden. Hier besteht Spielraum für Weiterentwicklungen des neuen Index.

5.3 Validierung des neuen Index im Experiment

Im vorherigen Kapitel wurde beschrieben, wie die Farbdifferenz bedingt durch einen Beobachterfeldgrößenwechsel theoretisch errechnet werden kann, wenn man für beide untersuchten Beobachterfeldgrößen Spektralwertfunktionen zur Verfügung hat, die die Farbwahrnehmung korrekt abbilden. Mit Hilfe von Farbdifferenzbewertungen sollte überprüft werden, ob die errechneten Farbdifferenzen auch den wahrgenommenen Farbdifferenzen entsprechen. Mit diesem Ziel wurde mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° das Testfeld an das Referenzfeld angeglichen. Dann bewerteten die Probanden im 10°-Beobachterfeld die wahrgenommene Farbdifferenz. Diese Untersuchung kann lediglich Aussagen darüber treffen, ob die errechneten Farbdifferenzen der Rangfolge nach der visuellen Wahrnehmung entsprechen. Weiterführende Untersuchungen zur empfindungsgemäßen Darstellung von Farbabständen sind unerlässlich.

5.3.1 Versuchsbedingungen

Die Versuchsbedingungen bei den Untersuchungen zum Beobachterfeldgrößeneinfluss entsprachen denen der Farbdifferenzbewertungen aus Kapitel 4.2 und der Abgleichuntersuchungen aus Kapitel 4.1. Die Versuche fanden in dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Abgleichstand statt und wurden von derselben Probandengruppe ausgeführt. Die Probandenzahl war auf $n=19$ reduziert, da ein Proband an den Untersuchungen nicht teilnehmen konnte. Es wurden die drei Lichtfarben des Lichtfarbensatzes 1 mit den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K untersucht. Die Umgebungsbeleuchtung wurde jeweils an die zu untersuchende Farbtemperatur angepasst. Die Leuchtdichte der Umgebungsbeleuchtung betrug 70 cd/m^2 . Das Ziel der Untersuchung bestand darin zu ermitteln, wie stark sich der Farbeindruck vormals gleich wahrgenommener Spektren ändert, wenn lediglich die Beobachterfeldgröße, unter der die beiden Testlichtfelder betrachtet werden, geändert wird. Nachdem die Un-

tersuchungen aus Kapitel 4.2 ergeben haben, dass die Probandengruppe die Farbdifferenzen zwischen den beiden Testfeldern im 2°-Beobachterfeld unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° als kaum bis gerade wahrnehmbar bewerteten, wurden diese Kurven für die Untersuchungen zum Beobachterfeldgrößeneinfluss herangezogen. Das Testfeld wurde mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° farblich an die Referenzfläche angeglichen. Die Leuchtdichte der beiden Testfelder wurde dementsprechend mit Hilfe der $V_{\text{Sharpe}}(\lambda)$ -Funktion nach Sharpe [SSJJ11] für ein 2°-Beobachterfeld angepasst. Die Abweichungen zwischen Referenz- und Testfläche lagen sowohl bei Bewertung mit der Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{\text{Sharpe}-2^\circ}(\lambda)$ für ein 2°-Beobachterfeld, als auch unter Verwendung der Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{\text{Sharpe}-10^\circ}(\lambda)$ für ein 10°-Beobachterfeld unter fünf Prozent. Die Probanden bewerteten die so abgeglichenen Testspektren unter einem 10°-Beobachterfeld. Als Ergebnis wurde ausschließlich die Farbdifferenz ermittelt, die sich aufgrund einer Beobachterfeldgrößenänderung zwischen den vormals metameren Spektren ergab. Da die eingestellten Mischspektren denen aus den Farbdifferenzbewertungen aus Kapitel 4.2.1 entsprachen und die Versuche innerhalb desselben Zeitraums stattfanden, sind die Ergebnisse der Stabilitätsüberprüfung auch für diese Untersuchungen gültig.

5.3.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf verlief analog zu dem der Farbdifferenzbewertungen aus Kapitel 4.2 und 4.3. Die Testperson durfte zunächst alle Farbdifferenzen einer Farbtemperatur nacheinander ansehen. Danach bewertete sie alle sieben Farbdifferenzen einer Farbtemperatur in zufälliger Reihenfolge auf einer Skala von 0 bis 8 (vergleiche Kapitel 4.2.2). Bei jedem Umschaltvorgang schloss der Proband jeweils die Augen und adaptierte nach dem Öffnen der Augen mindestens 5 Sekunden auf das neue Versuchsszenario. Das Schließen der Augen während des Umschaltvorgangs minimiert den Einfluss der zuvor gesehenen Farbdifferenz auf die Bewertung des aktuellen Spektrenpaares. Nach einem Lichtfarbenwechsel adaptierte der Proband mindestens 2 Minuten auf die neue Umgebungslichtfarbe. Da durch die Verwendung der $V(\lambda)$ -Funktion für einen 2°-Beobachter die Leuchtdichte eventuell leicht fehlangepasst wurde, sollten die Probanden bewusst nur Farbunterschiede bewerten. Aufgrund

der geringen Leuchtdichtefehlanspassung unter fünf Prozent wird davon ausgegangen, dass diese sich nicht auf die Farbdifferenzbewertungen auswirkt.

5.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Farbdifferenzbewertungen zeigen, welche Werte die wahrgenommenen Farbdifferenzen annehmen, die allein durch eine Beobachterfeldgrößenänderung entstehen. Weiterhin kann mit Hilfe der hier ermittelten Ergebnisse getestet werden, ob der in Kapitel 5.2 vorgestellte Index korrekte Vorhersagen darüber liefert, wie gut zwei Spektren unabhängig von der Beobachterfeldgröße einen farblich homogenen Eindruck liefern. Zur Ermittlung der Indexwerte werden die Spektren aus den Stabilitätsmessungen, beschrieben in Kapitel 4.2.1, herangezogen. Die Indexwerte für die unterschiedlichen Kombinationen aus Lichtfarbe und Versuchsszenario sowie die Ergebnisse der Farbdifferenzbewertungen sind in Tabelle 5.3 aufgeführt. Abbildung 5.7 zeigt den Zusammenhang zwischen den subjektiven Farbdifferenzbewertungen $\Delta E_{\text{sub}(2^\circ/10^\circ)}$ und den berechneten Indexwerten $\Delta u'v'_{\text{MIB}(2^\circ/10^\circ)}$. Es lässt sich beobachten, dass innerhalb einer Bewertungsrunde bei einer Farbtempe-

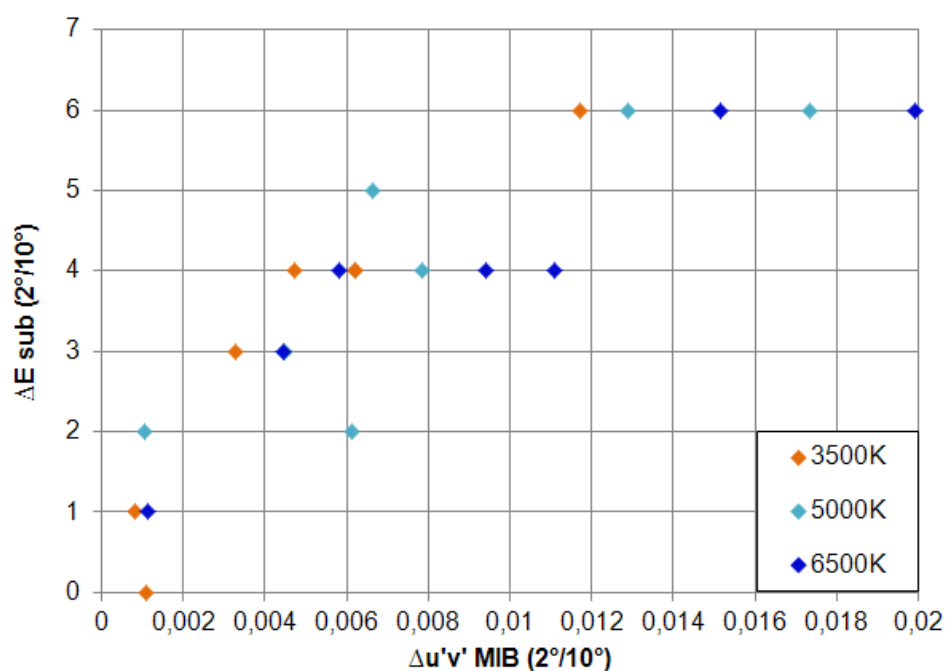


Abbildung 5.7 – Zusammenhang zwischen den Medianen (n=19) der subjektiven Farbdifferenzbewertungen $\Delta E_{\text{sub}(2^\circ/10^\circ)}$ und den Werten des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit $\Delta u'v'_{\text{MIB}(2^\circ/10^\circ)}$.

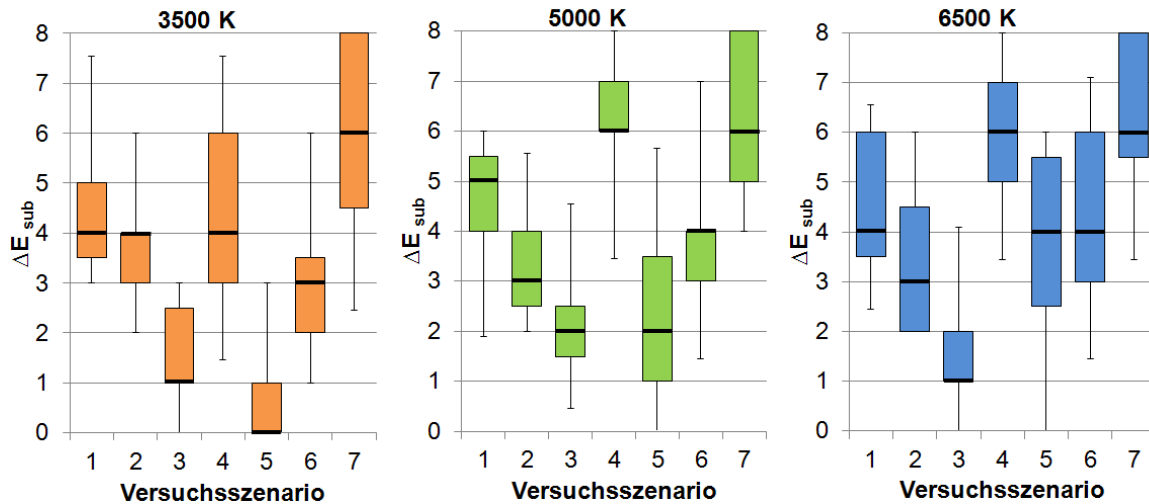


Abbildung 5.8 – Box-Whisker-Plots ($n=19$) der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} zwischen den beiden Testlichtfeldern, abgeglichen mit den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und bewertet im 10°-Beobachterfeld. Versuchsszenarien VS1 bis VS7 für die Farben des Lichtfarbensatzes 1. Die Whisker stellen die 2,5%- bzw. 97,5%-Perzentile der Bewertungsergebnisse dar.

ratur die maximale Farbdifferenzbewertung immer bei $\Delta E_{sub(2^\circ/10^\circ)} = 6$ liegt, unabhängig von den maximalen Indexwerten $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ/10^\circ)}$. Scheinbar ist die Skala, auf der die Probanden die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen bewerten, nicht unabhängig von den maximalen dargebotenen Farbdifferenzen. Um den Zusammenhang zwischen den beiden Werten besser erfassen zu können, wird der Rangkorrelationskoeffizient zwischen dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit und den Medianen der wahrgenommenen Farbdifferenzen ermittelt. Die Rangkorrelationskoeffizienten wurden für die einzelnen Farbtemperaturen getrennt ermittelt. Für 3500 K ergab sich ein Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman von $r_s = 0,93$, für 5000 K lag dieser bei $r_s = 0,89$ und für 6500 K bei $r_s = 0,96$. Die Korrelationen sind für alle drei Farbtemperaturen auf der $\alpha = 0,01$ -Stufe signifikant. Die Signifikanzgrenze für $n=7$ und $\alpha = 0,01$ für den einseitigen Test ist der Literatur [BL03](Tabelle O, S. 397) zu entnehmen.

5.3.4 Diskussion

Mit den hier beschriebenen Farbdifferenzbewertungen konnte gezeigt werden, dass der Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit tatsächlich Voraussagen darüber ermöglicht, wie groß die Farbdifferenz zwischen zwei vormals metameren Spektren sein wird, wenn sich die Beobach-

Tabelle 5.3 – $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ/10^\circ)}$ -Werte für einen Beobachterfeldgrößenwechsel von 2° auf 10° und Mediane ($n=19$) der subjektiven Farbdifferenzbewertungen $\Delta E_{sub(2^\circ/10^\circ)}$ der mittels 2006-TUIL- 2° -Funktionen angeglichenen Testfelder unter Beobachtung im 10° -Beobachterfeld.

| | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|--------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ/10^\circ)}$ | | | | | | |
| 3500 K | 0,0062 | 0,0047 | 0,0008 | 0,0062 | 0,0011 | 0,0033 | 0,0117 |
| 5000 K | 0,0066 | 0,0045 | 0,0010 | 0,0129 | 0,0061 | 0,0079 | 0,0173 |
| 6500 K | 0,0058 | 0,0045 | 0,0011 | 0,0151 | 0,0094 | 0,0111 | 0,0199 |
| | $\Delta E_{sub(2^\circ/10^\circ)}$ | | | | | | |
| 3500 K | 4 | 4 | 1 | 4 | 0 | 3 | 6 |
| 5000 K | 5 | 3 | 2 | 6 | 2 | 4 | 6 |
| 6500 K | 4 | 3 | 1 | 6 | 4 | 4 | 6 |

terfeldgröße ändert, unter der diese betrachtet werden. Die Rangkorrelation zwischen errechneten Indexwerten und visuellen Farbdifferenzbewertungen ist hoch signifikant ($r_s = 0,89..0,96$).

Da hier zunächst nur eine Rangkorrelation festgestellt werden konnte, ist es nicht möglich auf dieser Basis Grenzen zu ermitteln, ab welchen Indexwerten die Kompatibilität der verwendeten LED-Systeme unakzeptabel wird. Daher sollten weitere Untersuchungen mit Analogskalen folgen, die diese Zusammenhänge gezielt untersuchen.

Bei dem Zusammenhang zwischen den Werten der subjektiven Farbdifferenzbewertung und den errechneten Indexwerten fällt auf, dass sich mit einer größeren Spanne der Farbabstände $\Delta u'v'$ innerhalb einer Bewertungseinheit, die individuelle Bewertungsskala der Probanden anpasste. Je größer die größte zu bewertende Farbdifferenz war, desto weiter spreizten die Probanden die subjektive Bewertungsskala auf. Kleinere Farbdifferenzen wurden auf einmal unkritischer bewertet. Vom Weber-Fechner-Gesetz ist der Zusammenhang bekannt, dass der Mensch auf kleine Reizänderungen bei geringen Reizwerten deutlich empfindlicher reagiert als bei größeren Ausgangswerten [WS00] (S.490). Die Reizschwelle steigt also proportional zum dargebotenen Ausgangsreiz. Das bedeutet für die Anwendung, dass die Indexwerte eventuell entsprechend der zu bewertenden Beleuchtungssituation unterschiedlich kategorisiert werden sollten. Auf großen homogen ausgeleuchteten Flächen werden die Beobachter kritischer auf kleine Farbdifferenzen reagieren als bei Flächen, die bereits größere Farbdifferenzen enthalten.

5.4 Fazit: Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung genauer untersucht. Zunächst wurde ermittelt, wie stark sich die Änderung der Beobachterfeldgröße auf die Wahrnehmung von zwei nebeneinander dargebotenen Spektren auswirkt. Es wurde gezeigt, dass sich die resultierenden Farbdifferenzen bei den untersuchten Spektralverteilungen in einem Bereich zwischen $\Delta u'v'_{K-G} = 0,0010$ und $\Delta u'v'_{K-G} = 0,0200$ bewegen. Dabei sind nicht unbedingt die Versuchsszenarien mit den größten Spektraldifferenzen auch die mit den größten Farbortverschiebungen. Eine Änderung der Farbwahrnehmung aufgrund der Beobachterfeldgröße kann starke Auswirkungen auf die farblich homogene Ausleuchtung von größeren Flächen haben. Daher wurde nach einer Möglichkeit gesucht, Spektren auf ihre Eignung für eine gemeinsame Nutzung in einer großen Flächenausleuchtung zu testen. Vor allem bei LEDs, deren Spektralverteilungen produktionsbedingt immer leicht variieren, wäre es von großem Vorteil, vorab feststellen zu können, ob diese kompatibel sind. Der in diesem Kapitel vorgestellte Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit (MIB) ermöglicht dies. Das Ziel des Index besteht darin, Aussagen über die Farbdifferenzen treffen zu können, die entstehen, wenn ein vormalig metameres Paar seinen Farbeindruck allein aufgrund der Modifizierung der Beobachterfeldgröße ändert.

Es wurden zwei unterschiedliche Methoden zur Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit vorgestellt. Die direkte Methode ist sehr einfach zu verstehen und umzusetzen. Nachdem mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° metamere Mischspektren ermittelt wurden, berechnet man die Farbörter der beiden Mischspektren im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10°. Die resultierende Farbdifferenz zwischen den beiden Farbörtern entspricht dem Wert des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Die Methode der Berechnung über das Differenzspektrum ist weniger intuitiv und komplexer, hat im Gegenzug aber andere Vorteile. Mit Hilfe der spektralen Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen $\Delta u'_{empf}$ und $\Delta v'_{empf}$ ist es möglich, die Abhängigkeit des Index von Spektraldifferenzen der zu vergleichenden Spek-

tren zu visualisieren. Dadurch wird schnell ersichtlich, dass nur die Differenz zwischen den Vergleichsspektren relevant ist. Die generelle Form der Spektralverteilungen, ob stark kontinuierlich oder mit deutlichen Peaks versehen, hat keinerlei Einfluss auf die Empfindlichkeit der zu vergleichenden Spektren gegenüber einer Änderung der Beobachterfeldgröße. Zudem lässt sich auf einen Blick feststellen, dass es nicht möglich ist, die Betrachtungen auf einzelne, besonders ausschlaggebende Wellenlängenbereiche zu reduzieren. Obwohl Spektraldifferenzen in bestimmten Wellenlängenbereichen deutlich stärkeren Einfluss auf die Farbwahrnehmung haben, muss immer der gesamte Spektralbereich in Betracht gezogen werden. Zudem wechseln die spektralen Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen ihr Vorzeichen. Das bedeutet Spektraldifferenzen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen können ihre Wirkung gegenseitig wieder aufheben.

Mit subjektiven visuellen Farbdifferenzbewertungen wurde der Index auf seine Verlässlichkeit geprüft. Dabei wurden die beiden Testfelder mit den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° für ein 2°-Beobachterfeld abgeglichen und dann im 10°-Beobachterfeld bewertet. Die Rangkorrelationskoeffizienten r_s zwischen den errechneten Indexwerten und den subjektiven Farbdifferenzbewertungen erreichen Werte zwischen 0,89 und 0,96. Das bedeutet, mit dem Metamerie-Index lässt sich tatsächlich vorhersagen, wie groß die Farbdifferenz zwischen zwei vormals visuell gleich wahrgenommenen Spektren sein wird, wenn sich lediglich die Beobachterfeldgröße ändert. Ist der Index groß, werden die beiden verglichenen Spektren unter unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen unterschiedliche Farbeindrücke bei dem Beobachter hervorrufen. Ist der Index klein, werden die beiden verglichenen Spektren unabhängig von der verwendeten Beobachterfeldgröße visuell gleich wahrgenommen. Damit ist mit dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit ein Bewertungskriterium geschaffen worden, mit dessen Hilfe sich vorab feststellen lässt, welche LED-Komponenten für eine gemeinsame Verwendung in einer Be- oder Hinterleuchtungssituation geeignet oder ungeeignet sind.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde analysiert, welche neuen Herausforderungen die Einführung der LED-Technologie in farbmetrischer Hinsicht mit sich bringt. Zum einen galt es zu evaluieren, wie gut die Farbwahrnehmung unter Verwendung von LED-Lichtquellen mit Hilfe von Spektralwertfunktionen modelliert werden kann. Zum anderen wurde untersucht, welche Bedingungen LED-Spektren erfüllen müssen, um eine farblich homogene Flächenbeleuchtung zu realisieren.

Neue Spektralwertfunktionen für das 2°- und 10°- Beobachterfeld

Im ersten Teil der Untersuchungen wurde eine Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren erstellt. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Spektralzusammensetzungen der Vergleichsspektren an verschiedenen Farbörtern untersucht. Die Abgleichversuche wurden jeweils in einem 2°, 5°- und 10°-Beobachterfeld durchgeführt, um den Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung quantifizieren zu können. Anhand dieser Datenbasis wurden zunächst die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 auf ihre Fähigkeit hin untersucht, visuell gleich wahrgenommene Spektren im UCS- $u'v'$ -Farbraum auf denselben Farbart abzubilden. Für die Mehrheit der Spektralvergleiche ergaben sich für die Abgleiche im 2°-Beobachterfeld deutliche Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren. Die Farbraumfehler zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren erreichten unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1931 maximale Werte von bis zu $\Delta u'v'_{K/G-Referenz} = 0,0165$. Sie sind stark ab-

hängig von den Spektralverteilungen der verglichenen Spektren. Beim Vergleich unterschiedlicher RGBW-Spektren, wie sie in der Praxis vorkommen, wurden mittlere Farbraumfehler von $\Delta u'v'_{K/G-Referenz} = 0,0100$ nachgewiesen. Diese Farbdifferenzen sind deutlich wahrnehmbar und führen in der praktischen Anwendung bei farblich homogenen Flächenbeleuchtungen zu inakzeptablen Farbunterschieden. Die Hypothese, dass die größten Fehler in der Modellierung der Empfindlichkeitsfunktionen im Bereich niedriger Wellenlängen auftreten, konnte bestätigt werden. Die Farbraumfehler schlugen sich hauptsächlich in der v' -Koordinate nieder. Die großen Farbabstände zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren bedeuten im Rückschluss auch, dass rechnerisch metamere Spektren einen deutlich unterschiedlichen Farbeindruck bei den Beobachtern hervorrufen. Mit den Normspektralwertfunktionen CIE 1931 ist es demnach für viele LED-Lichtquellen nicht möglich, diese so anzusteuern, dass sie denselben Farbeindruck liefern.

Die Farbdifferenzen zwischen den Abgleichergebnissen aus dem 2°-Beobachterfeld und dem 10°-Beobachterfeld nahmen im UCS- $u'v'$ -Farbraum abhängig von den verglichenen Spektren stark unterschiedliche Werte an. Für den Großteil der Versuchsszenarien lagen sie deutlich über der Wahrnehmungsschwelle. Demnach darf der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung nicht vernachlässigt werden. Folglich werden zwei Sätze Spektralwertfunktionen benötigt, die jeweils die Farbwahrnehmung für das 2°-Beobachterfeld und das 10°-Beobachterfeld zufriedenstellend modellieren und für die Erfassung von LED-Lichtquellen geeignet sind. Daher wurden entsprechend der verwendeten Beobachterfeldgröße die unterschiedlichen Spektralwertfunktionen auf ihre Fähigkeit getestet, visuell gleich wahrgenommene Spektren in den entsprechenden $u'v'$ -Farbräumen auf denselben Farbort abzubilden. Zum Einsatz kamen neben den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 auch die Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und CIE2006-10° der CIE sowie die an der Universität von Pannonia entwickelten Spektralwertfunktionen 2006-UP-2°. Trotz einer deutlichen Reduktion der Farbraumfehler gegenüber den Normspektralwertfunktionen CIE1931 lagen die meisten Farbdifferenzen auch für diese Spektralwertfunktionen über der Wahrnehmungsschwelle von $\Delta u'v' = 0,0040$.

Daraufhin wurden mit Hilfe der zuvor erstellten Datenbasis neue Spektralwertfunktionen entwickelt. Diese basieren grundlegend auf den Sehzapfen-

Grundfunktionen der CIE2006. Lediglich die S-Zapfen-Empfindlichkeit wurde um 3 nm in Richtung niedrigerer Wellenlängen verschoben und neue Transformationsmatrizen für die Überführung der $\bar{l}(\lambda)$ -, $\bar{m}(\lambda)$ -, $\bar{s}(\lambda)$ -Funktionen in $\bar{x}(\lambda)$ -, $\bar{y}(\lambda)$ -, $\bar{z}(\lambda)$ -Funktionen wurden entwickelt. Mit den neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° konnten die Farbraumfehler mit 95%iger Sicherheit auf Werte unter $\Delta u'v'_{K/G-Referenz} = 0,0040$ reduziert werden und liegen damit im Bereich der Wahrnehmungsschwelle.

Um zu überprüfen, ob sich die Verringerung der Farbraumfehler tatsächlich auf die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen auswirkt, wurden Farbdifferenzbewertungen durchgeführt. Diese fanden unter denselben Versuchsbedingungen wie bei den Abgleichversuchen statt. Die Probanden bewerteten zwei Testfelder, deren Spektren mit Hilfe der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen auf denselben Farbort eingestellt wurden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte, dass die wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{sub} = 0..2$) reduziert werden konnten. Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen wurden die Farbdifferenzen dagegen als 'klein' bis 'deutlich' unterschiedlich ($\Delta E_{sub} = 4..6$) bewertet. Die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen konnten unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° signifikant verringert werden. Es wurde gezeigt, dass metamere Spektren, die mit den neuen Spektralwertfunktionen ermittelt wurden, bei den Probanden tatsächlich denselben Farbeindruck hervorriefen.

Die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° wurden empirisch auf Basis der Daten aus den Abgleichergebnissen ermittelt. Daher wurde in einem weiteren Versuch getestet, ob die Funktionen auch bei anderen Farbörtern unter Verwendung anderer Spektralzusammensetzungen ihre Gültigkeit beibehalten. Mit drei Versuchsszenarien wurden an fünf Farbörtern für gesättigte Lichtfarben Farbdifferenzbewertungen durchgeführt. Dabei wurden mit Hilfe der Spektralwertfunktionen der CIE sowie der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° die beiden Testfelder aneinander angepasst. Die Untersuchungen ergaben, dass auch für gesättigte Lichtfarben unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° die geringeren Farbdifferenzen wahrgenommen wurden. Damit konnte die Relevanz der neuen Spek-

tralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° für die Modellierung der Farbwahrnehmung von gesättigten Lichtfarben nachgewiesen werden.

Die neuen Spektralwertfunktionen erlauben eine korrekte Modellierung der Farbwahrnehmung der untersuchten Probandengruppe und sind für die korrekte Bewertung der farbmetrischen Eigenschaften von LED-Lichtquellen geeignet.

Es gilt jedoch zu beachten, dass die in dieser Arbeit präsentierten Untersuchungsergebnisse unter Laborbedingungen entstanden. Ihre Allgemeingültigkeit ist daher durch die verwendeten Untersuchungsparameter beschränkt. Zunächst beziehen sich die vorgestellten Untersuchungen auf eine Probandengruppe ($n=20$) mit einem Alter zwischen 23 und 45 Jahren. Vor allem nach oben wurde das Alter bewusst begrenzt, um zu große Streuungen unter den Beobachtern zu vermeiden. Weitere Untersuchungen zur Farbwahrnehmung älterer Testpersonen sollten folgen. Ist die Modellierung der altersbedingten Änderung der Farbwahrnehmung der CIE Empfehlung CIE170-1:2006 [TC-06] korrekt, könnten die neuen Spektralwertfunktionen auch für andere Altersgruppen ermittelt werden. Für eine weitere Absicherung der Untersuchungsergebnisse sollten die Farbdifferenzbewertungen zur Verifizierung der Verbesserung der Farbwahrnehmungsmodellierung durch die neuen Spektralwertfunktionen mit einer größeren Anzahl Probanden durchgeführt werden. Dabei sollte eine möglichst große Zahl unterschiedlicher Spektralzusammensetzungen zum Einsatz kommen. Nicht zuletzt wäre es von besonderem Interesse die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° in praktischen Anwendungsbeispielen zu testen.

Mit den neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° wird es möglich, mit Hilfe von Rechenalgorithmen die Farbörter von LED-Systemen für eine definierte Beobachterfeldgröße so einzustellen, dass diese denselben Farbeindruck hervorrufen. Damit ist ein großer Schritt hin zur Realisierung farblich homogener Flächenbeleuchtungen getan. Allerdings gilt es bei der farblich homogenen Beleuchtung von Flächen mit unterschiedlichen LED-Spektren drei Einschränkungen zu beachten. Zunächst muss der Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung berücksichtigt werden, da zwei Spektren in praktischen Anwendungen selten unter einer definierten Beobachterfeldgröße betrachtet werden. Zwei Spektren die in einem 2°-Beobachterfeld

visuell den gleichen Farbeindruck liefern können in einem 10°-Beobachterfeld deutliche Farbdifferenzen aufweisen. Außerdem ist es nicht möglich für alle Beobachter einen zufriedenstellenden homogenen Farbeindruck zu realisieren, wenn die Interbeobachterstreuung zu groß ist. Zudem nehmen Probanden innerhalb einer messtechnisch absolut homogenen Testflächen deutliche Inhomogenitäten wahr, wenn die verglichenen Spektren stark unterschiedliche Spektralverteilungen besitzen. Dabei zeigte sich im mittleren Bereich der Trennlinie zwischen den beiden Testflächen ein Farbfleck, der die Gegenfarbe zur Farbe der restlichen Testfläche annimmt. Dies ist zurückzuführen auf den Maxwell-Spot. Sowohl der Beobachterfeldgrößeneinfluss als auch die Interbeobachterstreuung und das Phänomen des Maxwell-Spots sind auf den Einfluss der Makulaschichtdicke und der Zapfenpigmentdichte zurückzuführen. Das bedeutet, mit einer Minimierung des Beobachterfeldgrößeneinflusses werden gleichzeitig die anderen Problematiken entschärft.

Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

Der zweite Teil dieser Arbeit behandelt daher den Einfluss der Beobachterfeldgröße auf die Farbwahrnehmung. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Abgleichuntersuchungen wurde ermittelt, dass die Farbdifferenzen zwischen den Abgleichergebnissen aus dem 2°-Beobachterfeld und dem 10°-Beobachterfeld bei den untersuchten Spektralverteilungen in einem Bereich zwischen $\Delta u'v'_{K-G} = 0,0010$ und $\Delta u'v'_{K-G} = 0,0200$ lagen. Für sechs der sieben untersuchten Versuchsszenarien lagen die Farbdifferenzen über der Wahrnehmungsschwelle. Bei genauer Betrachtung der verwendeten Spektren wurde deutlich, dass die Versuchsszenarien mit den ausgeprägtesten Spektraldifferenzen nicht unbedingt die größten Farbdifferenzen aufwiesen.

Um vorab bestimmen zu können, wie stark sich die Farbwahrnehmung von zwei vormals metameren Spektren durch eine Modifizierung der Beobachterfeldgröße ändern wird, wurde der neue Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit (MIB) vorgestellt. Mit diesem Index kann vorab bestimmt werden, ob sich zwei Spektren dafür eignen, gemeinsam eine größere Fläche homogen zu beleuchten. Vor allem bei LEDs, deren Spektralverteilungen produktionsbedingt immer leicht variieren, ist von großem Vorteil, vorab feststellen zu können, ob diese kompatibel sind. Zur Berechnung des Index

werden lediglich zwei Sätze Spektralwertfunktionen benötigt, die die Farbwahrnehmung unter den zu untersuchenden Beobachterfeldgrößen korrekt modellieren. In dieser Arbeit wurden die neu vorgestellten Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10° verwendet.

Es wurden zwei unterschiedliche Methoden zur Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit vorgestellt. Die direkte Methode ist sehr einfach zu verstehen und umzusetzen. Nachdem mit Hilfe der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° metamere Mischspektren ermittelt wurden, berechnet man die Farbörter der beiden Mischspektren im UCS- $u'v'$ -Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10°. Die resultierende Farbdifferenz zwischen den beiden Farbörtern entspricht dem Wert des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Die Methode der Berechnung über das Differenzspektrum ist weniger intuitiv und komplexer, hat im Gegenzug aber andere Vorteile. Mit Hilfe der spektralen Änderungs-Empfindlichkeitsfunktionen $\Delta u'_{empf}$ und $\Delta v'_{empf}$ ist es möglich, die Abhängigkeit des Index von Spektraldifferenzen der zu vergleichenden Spektren zu quantifizieren. Dadurch wird schnell ersichtlich, dass nur die Differenz zwischen den Vergleichsspektren relevant ist. Die generelle Form der Spektralverteilungen, ob stark kontinuierlich oder mit deutlichen Peaks versehen, hat keinerlei Einfluss auf die Empfindlichkeit der zu vergleichenden Spektren gegenüber einer Änderung der Beobachterfeldgröße. Zudem lässt sich auf einen Blick feststellen, dass es nicht möglich ist, die Betrachtungen auf einzelne, besonders ausschlaggebende Wellenlängenbereiche zu reduzieren. Obwohl Spektraldifferenzen in bestimmten Wellenlängenbereichen deutlich stärkeren Einfluss auf die Farbwahrnehmung nehmen, muss immer der gesamte Spektralbereich in Betracht gezogen werden. Außerdem wird aus den Änderungsempfindlichkeitsfunktionen ersichtlich, dass sich die Wirkungen starker Spektraldifferenzen durch einen Vorzeichenwechsel dieser Funktionen gegenseitig aufheben können. Es besteht demnach die Möglichkeit, dass auch Spektren mit großen Spektraldifferenzen ihre Farberscheinung bei einem Wechsel der Beobachterfeldgröße kaum ändern. Für die praktische Anwendung bedeutet diese Erkenntnis, dass man auch mit unterschiedlichen Spektren farblich homogene Flächenbeleuchtungen realisieren kann. Man muss lediglich mit Hilfe des neu eingeführten Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit die passenden Spektrenkombinationen auswählen.

Die Aussagekraft des Index wurde mit Hilfe von Farbdifferenzbewertungen untersucht. Dabei wurden die beiden Testfelder mit den Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° für ein 2°-Beobachterfeld abgeglichen und dann im 10°-Beobachterfeld bewertet. Zwischen den errechneten Indexwerten und den subjektiven Farbdifferenzbewertungen besteht eine starke Rangkorrelation mit Rangkorrelationskoeffizienten r_s zwischen 0,89 und 0,96. Damit konnte gezeigt werden, dass der Index tatsächlich Aussagen darüber zulässt, wie groß die wahrgenommene Farbdifferenz zwischen zwei im 2°-Beobachterfeld metameren Spektren unter Beobachtung im 10°-Beobachterfeld sein wird. Ist der Index groß, werden die beiden verglichenen Spektren unter unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen unterschiedliche Farbeindrücke bei dem Beobachter hervorrufen. Ist der Index klein, werden die beiden verglichenen Spektren unabhängig von der verwendeten Beobachterfeldgröße visuell gleich wahrgenommen. Der Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit stellt ein Bewertungskriterium dar, mit dessen Hilfe sich vorab feststellen lässt, welche LED-Komponenten für eine gemeinsame Verwendung in einer Be- oder Hinterleuchtungssituation geeignet oder ungeeignet sind. Mit dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit in Verbindung mit den neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° hat man nun Werkzeuge an der Hand, um homogene Flächenbeleuchtungen mit LED-Lichtquellen zu realisieren.

In der Praxis ließe sich der neu eingeführte Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit vor allem beim Test unterschiedlicher RGBW-LED-Systeme auf Kompatibilität gut einsetzen. In der Regel werden bei LED-Anwendungen LEDs unterschiedlicher Spektralzusammensetzung innerhalb bestimmter Grenzen miteinander gemischt. Mit einer Automatisierung der Index-Berechnung wäre es möglich alle verwendeten LED-Kombinationen auf ihre Anfälligkeit gegenüber Farbverschiebungen bedingt durch Beobachterfeldgrößenänderungen an unterschiedlichen Farbörtern zu testen. Damit ist ein neues Kriterium verfügbar, nach dem LEDs selektiert werden können, die gemeinsam für die Beleuchtung einer homogenen Fläche geeignet wären.

Da die Farbdifferenzbewertungen bisher nur mit einer Ordinalskala durchgeführt wurden, konnten lediglich grobe Tendenzen dafür angegeben werden, ab wann eine Farbdifferenz bedingt durch eine Beobachterfeldgrößenänderung wahrgenommen wird. Weitere Untersuchungen für eine genaue Kor-

relation zwischen Index-Werten und wahrgenommener Farbdifferenz sollten folgen. Noch wichtiger wäre ein Test des Index in praktischen Anwendungsgebieten um Kategorien für die Index-Werte zu ermitteln. Diese Kategorien sollten möglichst einfach gehalten werden. Der Anwender sollte auf einen Blick erkennen können, ob zwei Spektren für die gemeinsame Verwendung in einer Flächenbeleuchtung 'kompatibel', 'akzeptabel' oder 'inkompatibel' sind.

Analog zu dem hier vorgestellten Metamerie-Index ließe sich auch ein Metamerie-Index für Altersabhängigkeit schaffen. Dieser könnte Vorhersagen darüber ermöglichen, wie stark sich die Farberscheinung zweier Spektren für Beobachter unterschiedlichen Alters unterscheiden würde. Zur Ermittlung dieses Index müssten lediglich statt der Spektralwertfunktionen für ein 2°- und ein 10°-Beobachterfeld jene für einen 20 jährigen Standardbeobachter und für einen 60 jährigen Standardbeobachter für die Berechnungen herangezogen werden. Mit einem Metamerie-Index für Altersabhängigkeit könnte bestimmt werden, ob zwei Spektren dafür geeignet sind, unabhängig vom Alter des Beobachters, denselben Farbeindruck hervorzurufen.

Zudem wird empfohlen, den Metamerie-Index für einen Wechsel des Beobachters wieder stärker in Betracht zu ziehen. Dieser liefert Aussagen darüber, bei welchen Spektren besonders große Interbeobachterstreuungen auftreten. Daher ließe sich mit diesem Index der Zusammenhang zwischen dem Einfluss der Beobachterfeldgröße und der Intrabeobachterstreuung überprüfen. Für die Berechnung dieses Index müsste allerdings zunächst festgestellt werden, in welchem Rahmen die Spektralwertfunktionen von Normalbeobachtern streuen.

ANHANG

In diesem Anhang befinden sich alle in den einzelnen Versuchsszenarien verwendeten Spektren, Tabellen mit den mittels unterschiedlicher Spektralwertfunktionen berechneten Farbdifferenzen und Tabellen zu den Signifikanztests. Während der Untersuchung wurden die Daten von 20 Probanden erhoben. Alle Datensätze wurden dann mit fünf unterschiedlichen Sätzen von Spektralwertfunktionen weiterverarbeitet. Aufgrund der Datenmenge ist es nicht möglich, alle Werte an dieser Stelle zu präsentieren, daher sind hier nur die weiterverarbeiteten Daten enthalten. Die Originaldaten können über das Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau bezogen werden.

A.1 Referenz- und Testspektren: Lichtfarbensatz 1

Bei den Side-by-Side Abgleichversuchen aus Kapitel 4.1 wurden jeweils unterschiedliche Test- und Referenzspektren aufeinander abgeglichen. Sieben unterschiedliche Versuchsszenarien wurden untersucht. Die Abbildungen A.1, A.2 und A.3 zeigen die Referenz- und Testlichtspektren zu Beginn des Abgleichvorgangs bei den drei untersuchten Farbtemperaturen von 3500 K, 5000 K und 6500 K.

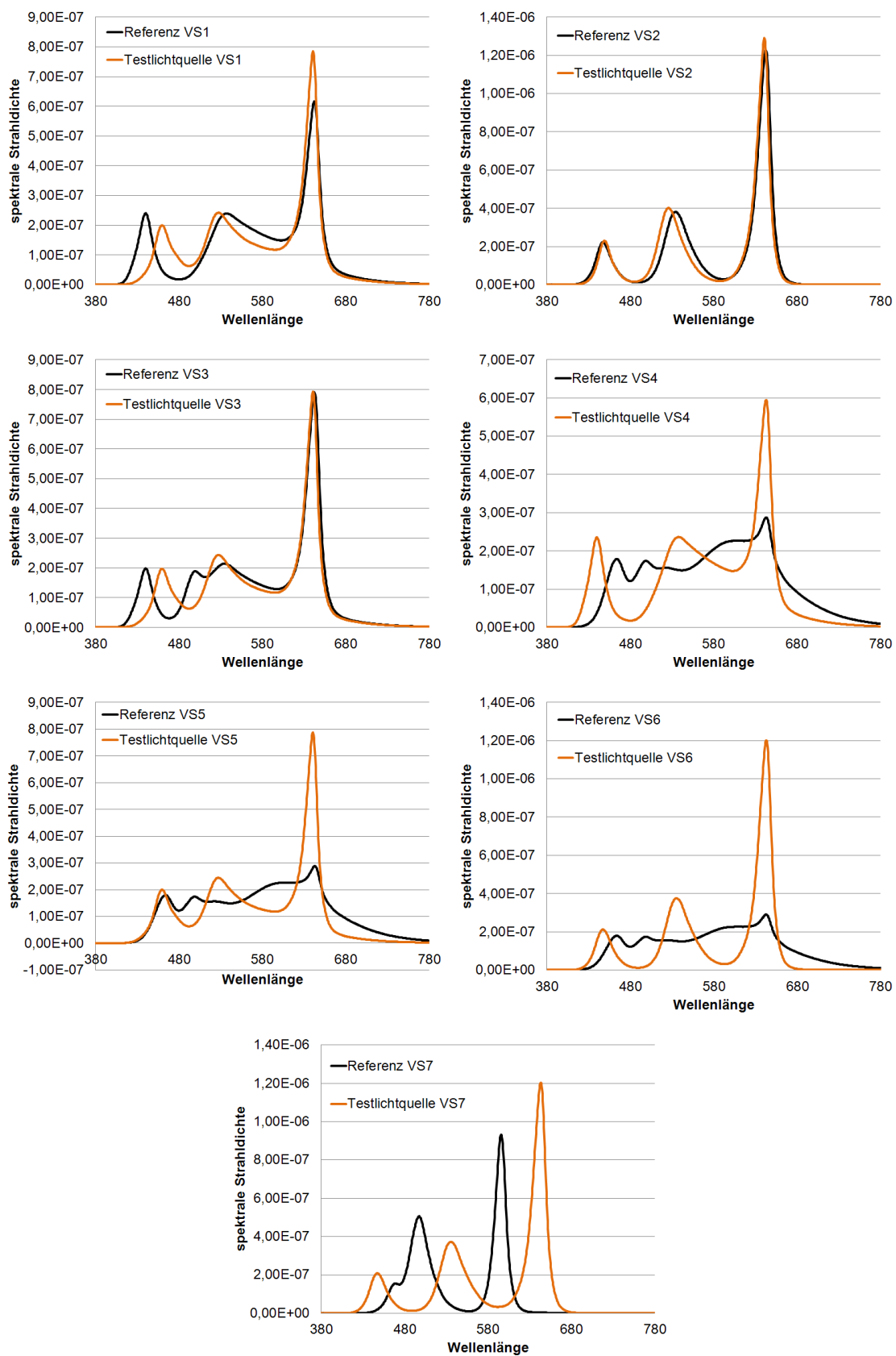


Abbildung A.1 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 zu Beginn der Abgleichversuche bei 3500 K, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

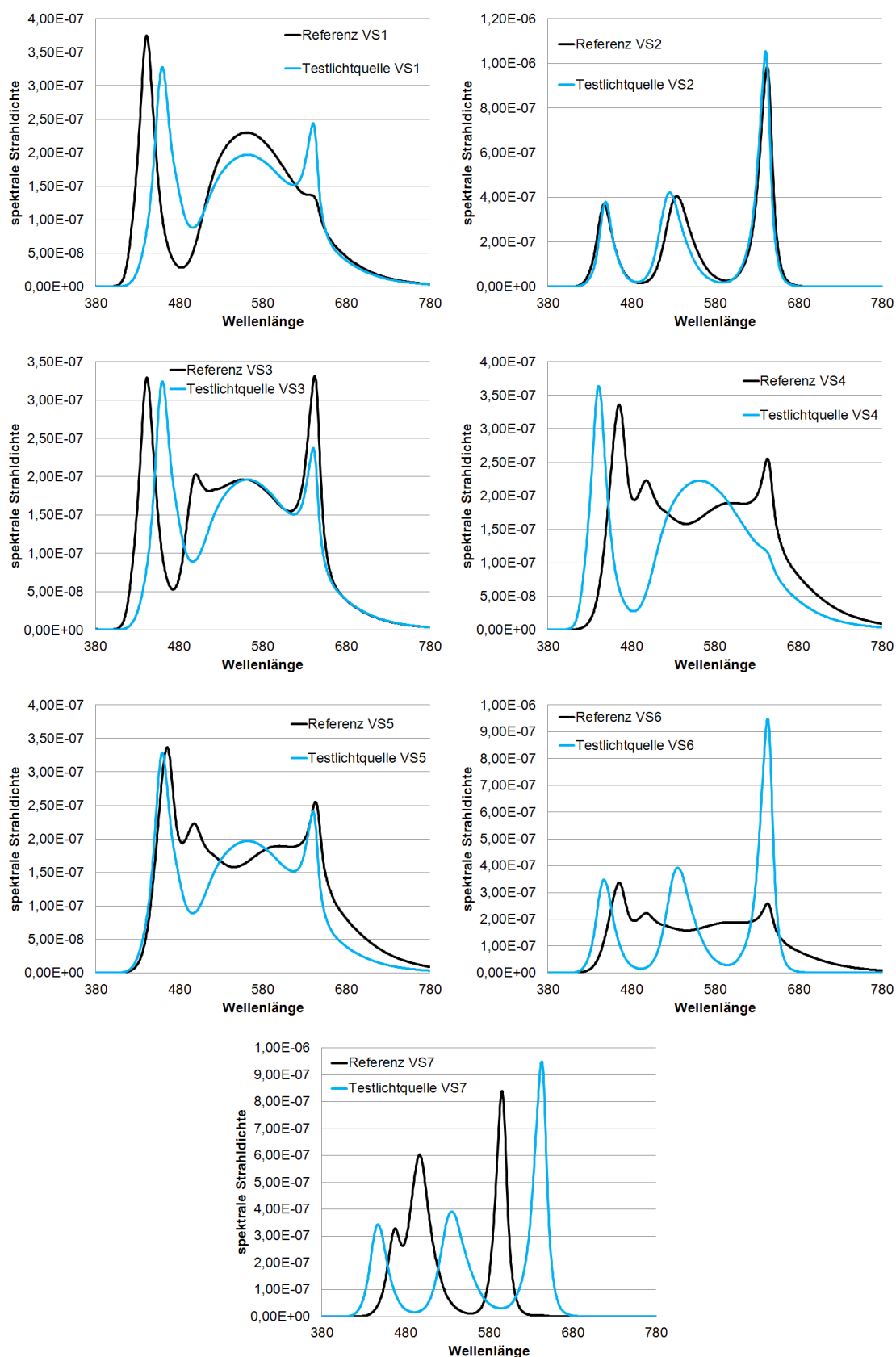


Abbildung A.2 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 zu Beginn der Abgleichversuche bei 5000 K, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

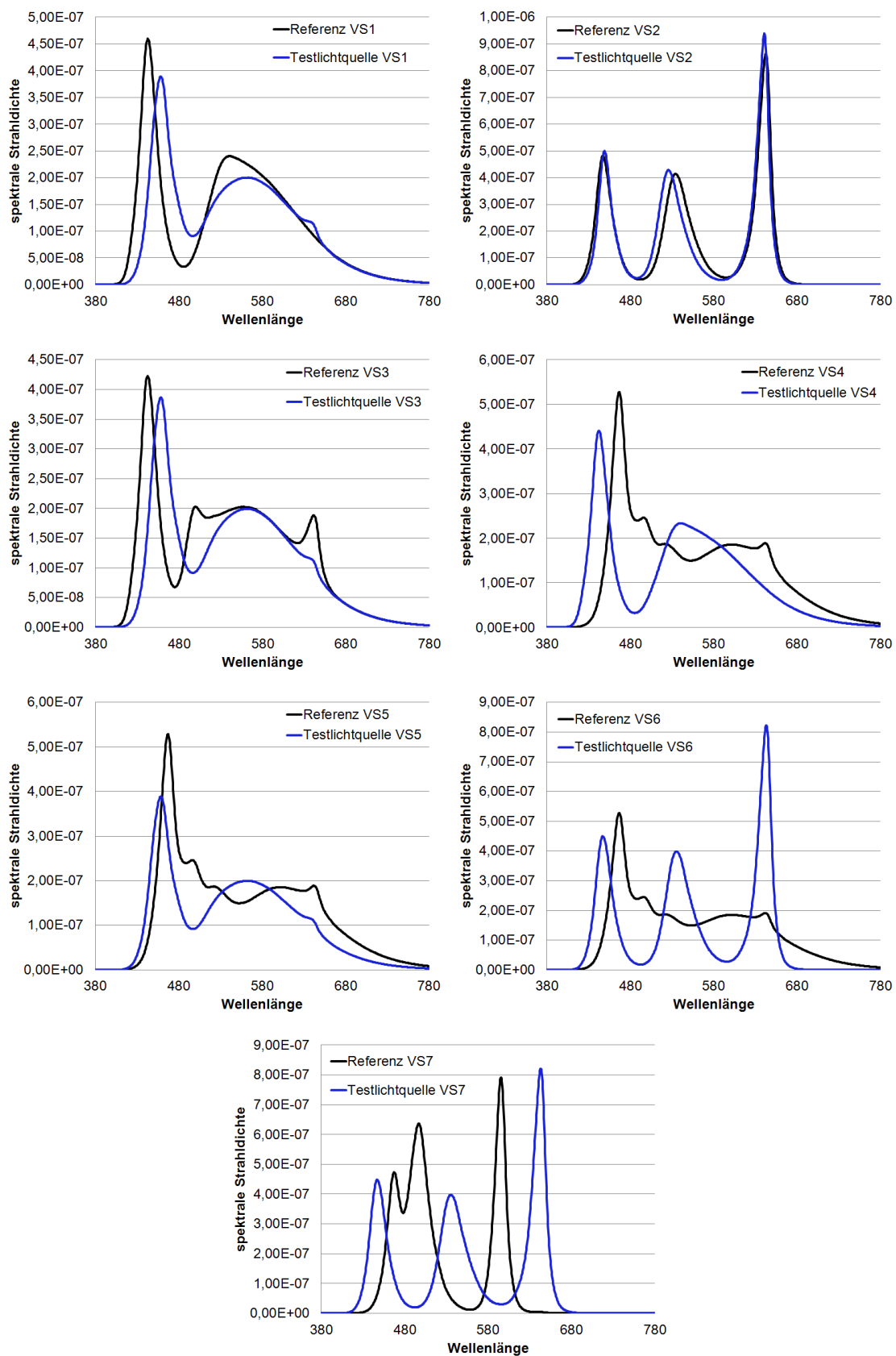


Abbildung A.3 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 zu Beginn der Abgleichversuche bei 6500 K, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

A.2 Referenz- und Testspektren: Lichtfarbensatz 2

In Kapitel 4.3 wurden Farbdifferenzbewertungen zur Validierung der Gültigkeit der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° an Farbörtern entfernt vom Planckschen Kurvenzug durchgeführt. Die Untersuchungen wurden mit den Referenz- und Testlichtquellen der drei Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für fünf unterschiedliche Testfarben des Lichtfarbensatzes 2 vorgenommen. In den Abbildungen A.4 bis A.8 sind die, messtechnisch mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931 aufeinander abgeglichenen, Referenz- und Testspektren der Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die jeweilige Testfarbe abgebildet.

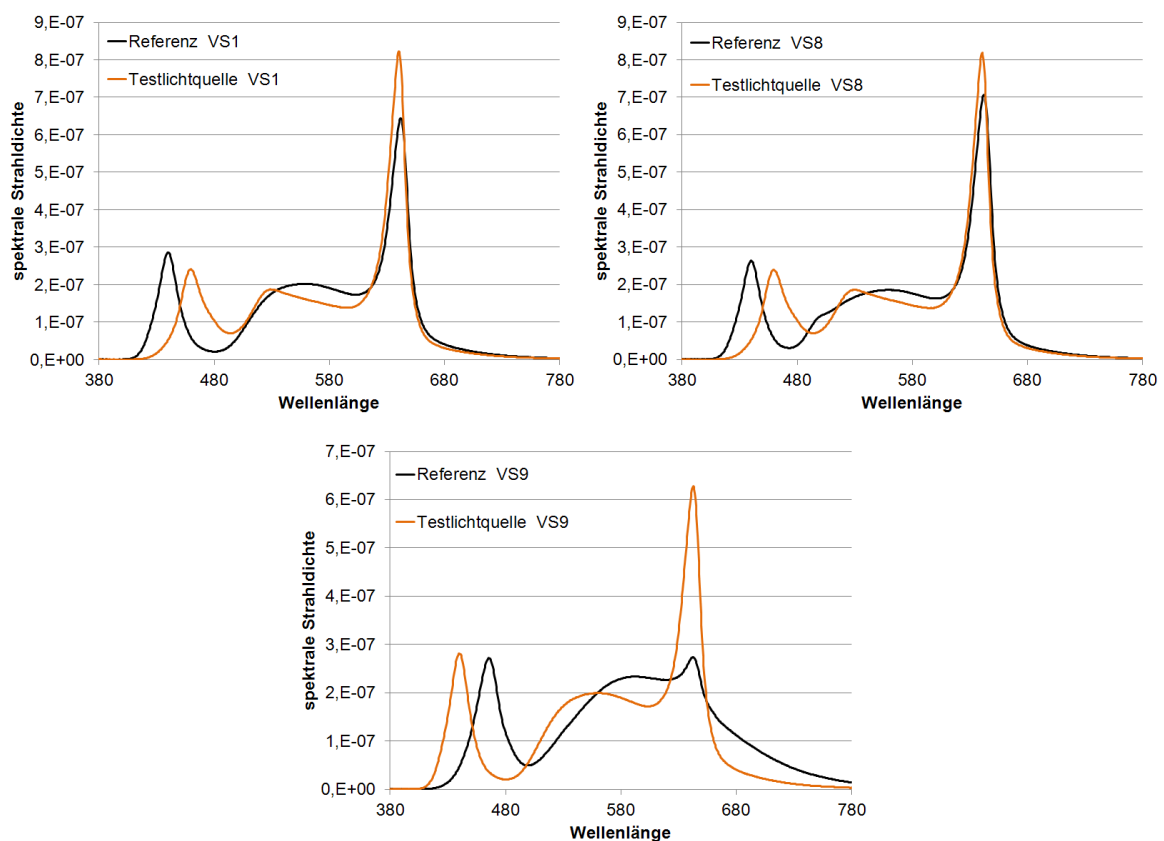


Abbildung A.4 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF1, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

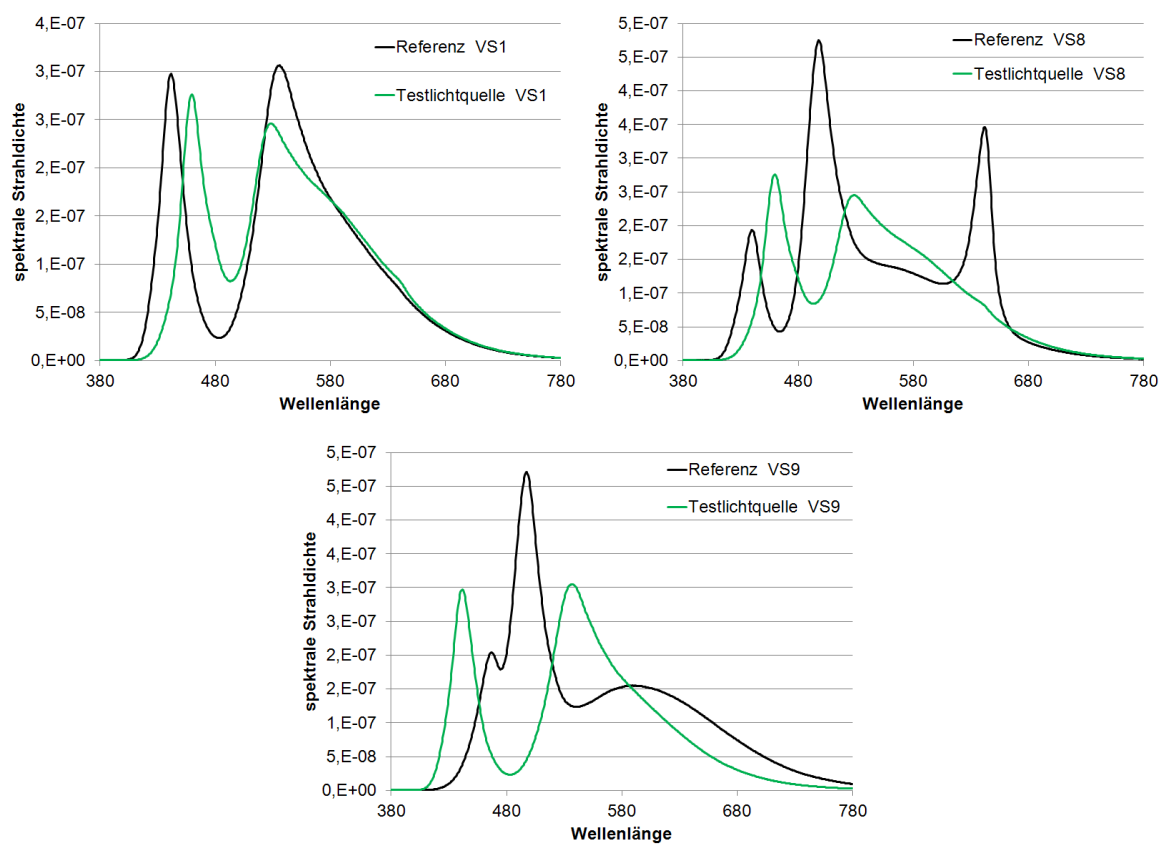


Abbildung A.5 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF2, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

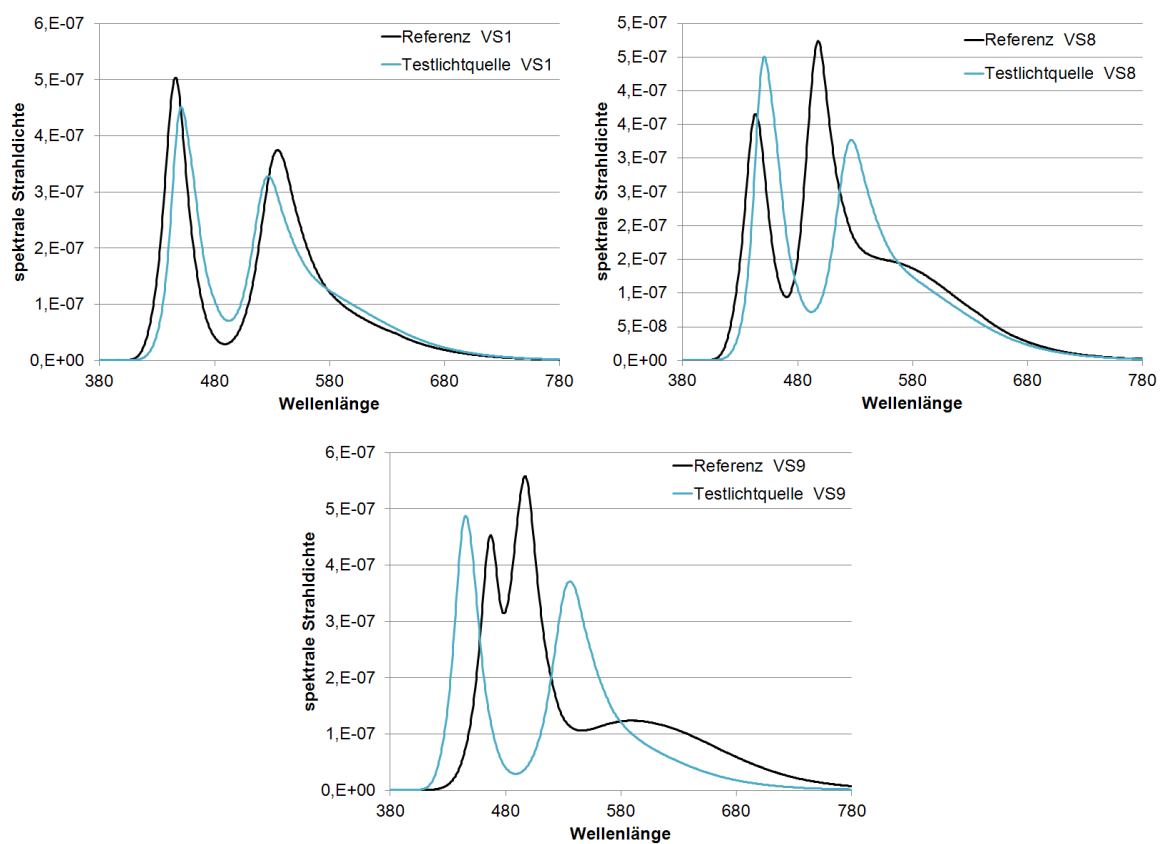


Abbildung A.6 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF3, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

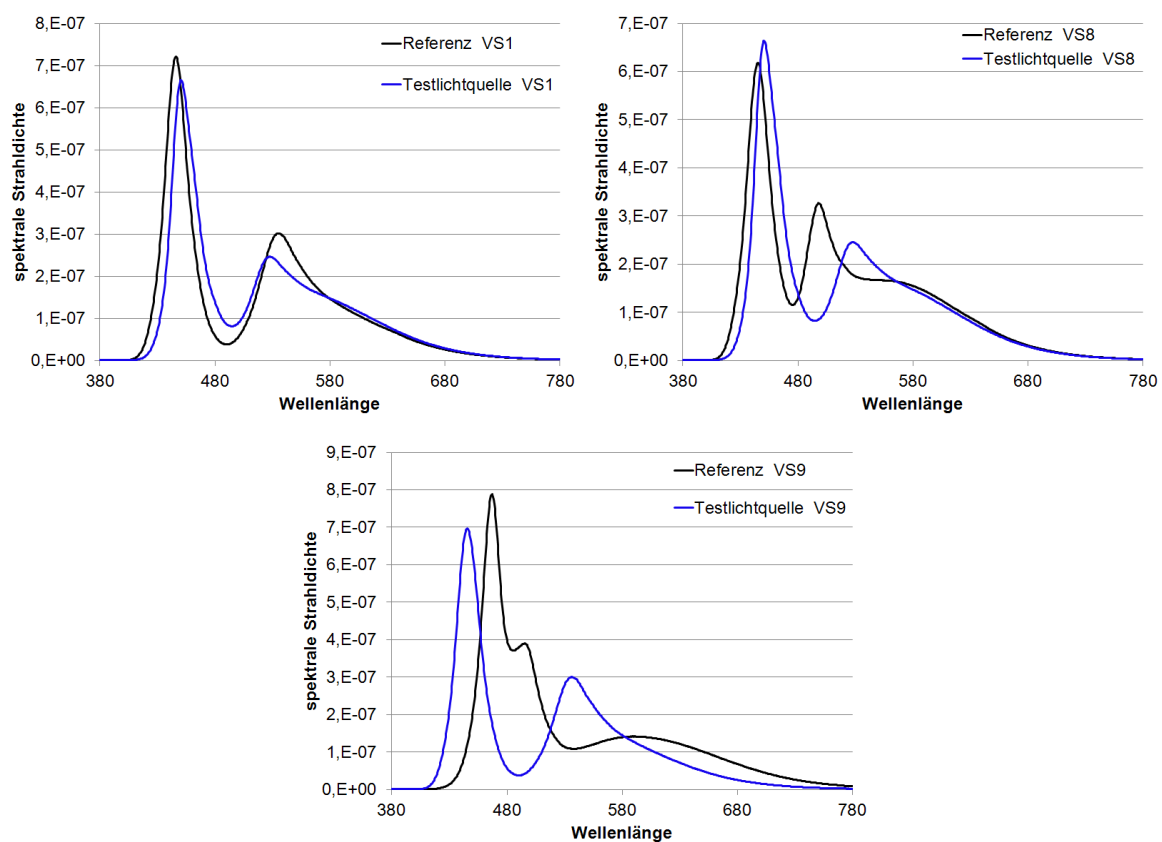


Abbildung A.7 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF4, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

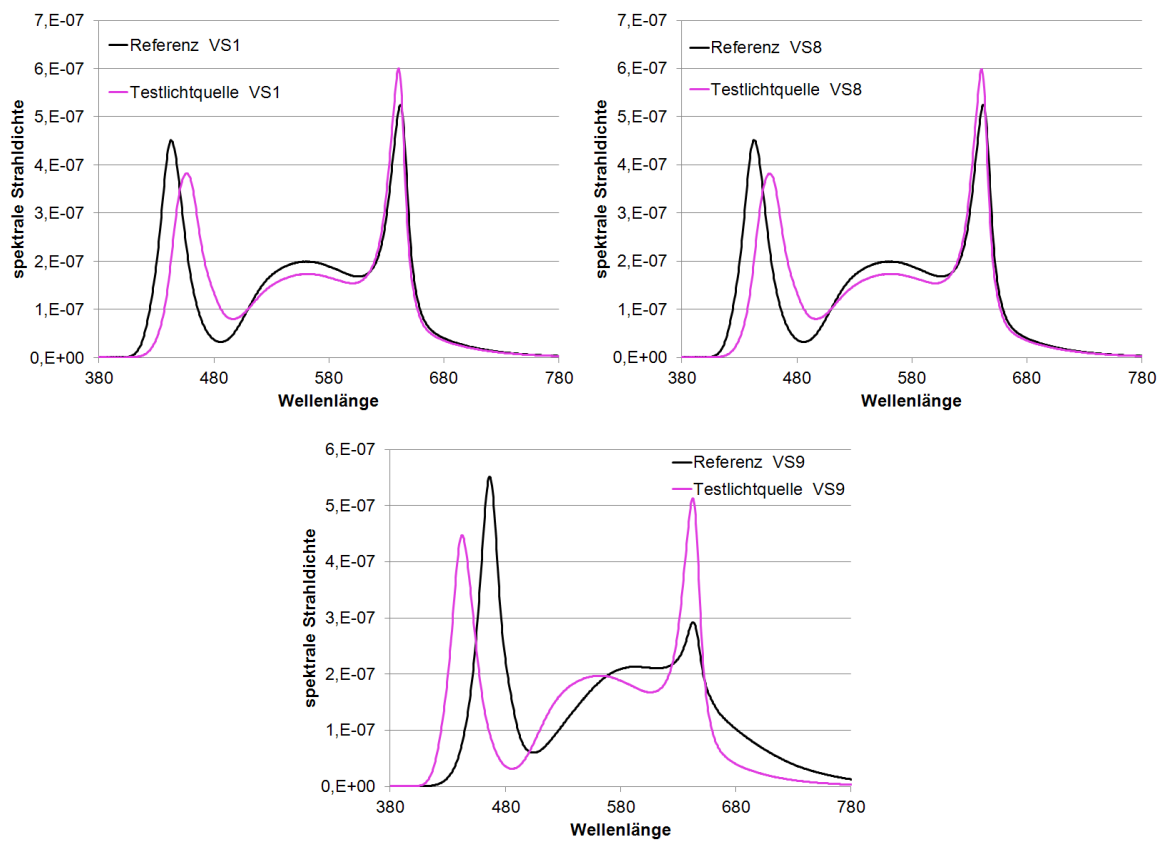


Abbildung A.8 – Spektren der Referenz- und Testlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für die Testfarbe TF5, messtechnisch abgeglichen mit den Normspektralwertfunktionen CIE1931.

A.3 Konstanzmessungen der Referenzlichtquelle

Bei den Abgleichuntersuchungen aus Kapitel 4.1 glichen alle Probanden die Testlichtquelle visuell auf eine dargebotene Referenzlichtquelle an. Um zu überprüfen, ob die Referenzlichtquelle über den Zeitraum der gesamten Untersuchungen stabil blieb und damit die Vergleichbarkeit der Abgleichergebnisse gewährleistet war, wurden zu Beginn jeder Abgleichsession eine Stabilitätsmessung der Referenzlichtquelle durchgeführt. Jede der verwendeten Lichtfarben von 3500 K, 5000 K und 6500 K wurde 20 Sekunden eingebrannt und dann mit einem Spektralradiometer vermessen. Tabelle A.1 zeigt die Mittelwerte der Leuchtdichten der Referenzlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 mit der dazugehörigen Standardabweichung für die Grundgesamtheit aller 20 Versuchssessions. Tabelle A.2 zeigt die Mittelwerte der Farbörter der Referenzlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 mit der dazugehörigen Standardabweichung für die Grundgesamtheit aller 20 Versuchssessionen.

Tabelle A.1 – Mittelwerte der Leuchtdichten der Referenzlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 mit der dazugehörigen Standardabweichung für die Grundgesamtheit aller 20 Versuchssessionen.

| Versuchsszenario | CCT | L | σ_L |
|------------------|--------|-----|------------|
| VS1 | 3500 K | 149 | 3 |
| VS2 | 3500 K | 108 | 17 |
| VS3 | 3500 K | 146 | 1 |
| VS4 | 3500 K | 145 | 1 |
| VS5 | 3500 K | 145 | 1 |
| VS6 | 3500 K | 146 | 1 |
| VS7 | 3500 K | 123 | 1 |
| VS1 | 5000 K | 151 | 3 |
| VS2 | 5000 K | 118 | 5 |
| VS3 | 5000 K | 145 | 1 |
| VS4 | 5000 K | 147 | 1 |
| VS5 | 5000 K | 147 | 2 |
| VS6 | 5000 K | 148 | 1 |
| VS7 | 5000 K | 139 | 1 |
| VS1 | 6500 K | 148 | 2 |
| VS2 | 6500 K | 112 | 12 |
| VS3 | 6500 K | 147 | 1 |
| VS4 | 6500 K | 147 | 1 |
| VS5 | 6500 K | 147 | 1 |
| VS6 | 6500 K | 147 | 1 |
| VS7 | 6500 K | 148 | 1 |

Tabelle A.2 – Mittelwerte der Farbörter der Referenzlichtquellen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 mit der dazugehörigen Standardabweichung für die Grundgesamtheit aller 20 Versuchssessions.

| Versuchsszenario | CCT | u'_{Mittel} | $\sigma_{u'}$ | v'_{Mittel} | $\sigma_{v'}$ |
|------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| VS1 | 3500 K | 0,2352 | 0,0001 | 0,5108 | 0,0001 |
| VS2 | 3500 K | 0,2356 | 0,0003 | 0,5114 | 0,0001 |
| VS3 | 3500 K | 0,2357 | 0,0001 | 0,5109 | 0,0001 |
| VS4 | 3500 K | 0,2348 | 0,0004 | 0,5112 | 0,0003 |
| VS5 | 3500 K | 0,2348 | 0,0004 | 0,5111 | 0,0003 |
| VS6 | 3500 K | 0,2347 | 0,0002 | 0,5110 | 0,0002 |
| VS7 | 3500 K | 0,2356 | 0,0002 | 0,5117 | 0,0002 |
| VS1 | 5000 K | 0,2112 | 0,0001 | 0,4847 | 0,0002 |
| VS2 | 5000 K | 0,2115 | 0,0003 | 0,4849 | 0,0002 |
| VS3 | 5000 K | 0,2112 | 0,0001 | 0,4850 | 0,0001 |
| VS4 | 5000 K | 0,2110 | 0,0004 | 0,4848 | 0,0001 |
| VS5 | 5000 K | 0,2110 | 0,0004 | 0,4848 | 0,0001 |
| VS6 | 5000 K | 0,2109 | 0,0002 | 0,4847 | 0,0001 |
| VS7 | 5000 K | 0,2110 | 0,0002 | 0,4844 | 0,0002 |
| VS1 | 6500 K | 0,2007 | 0,0001 | 0,4660 | 0,0001 |
| VS2 | 6500 K | 0,2010 | 0,0003 | 0,4660 | 0,0002 |
| VS3 | 6500 K | 0,2008 | 0,0001 | 0,4659 | 0,0001 |
| VS4 | 6500 K | 0,2001 | 0,0002 | 0,4653 | 0,0002 |
| VS5 | 6500 K | 0,2001 | 0,0002 | 0,4653 | 0,0002 |
| VS6 | 6500 K | 0,2000 | 0,0002 | 0,4652 | 0,0002 |
| VS7 | 6500 K | 0,2003 | 0,0002 | 0,4649 | 0,0002 |

A.4 Abgleichergebnisse K, M, G

Die Farbabgleichversuche aus Kapitel 4.1 wurden in drei unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen ($K=2^\circ$, $M=5^\circ$, $G=10^\circ$) durchgeführt. Abbildung A.9 zeigt die Abgleichergebnisse K, M und G der einzelnen Probanden und den Mittelwert der gesamten Probandengruppe für die Versuchsszenarien VS1 bis VS3 und VS5 bis VS7. Die Abgleiche aus dem 5° -Beobachterfeld liegen immer auf einer Verbindungslinie zwischen den 2° - und 10° -Abgleichergebnissen.

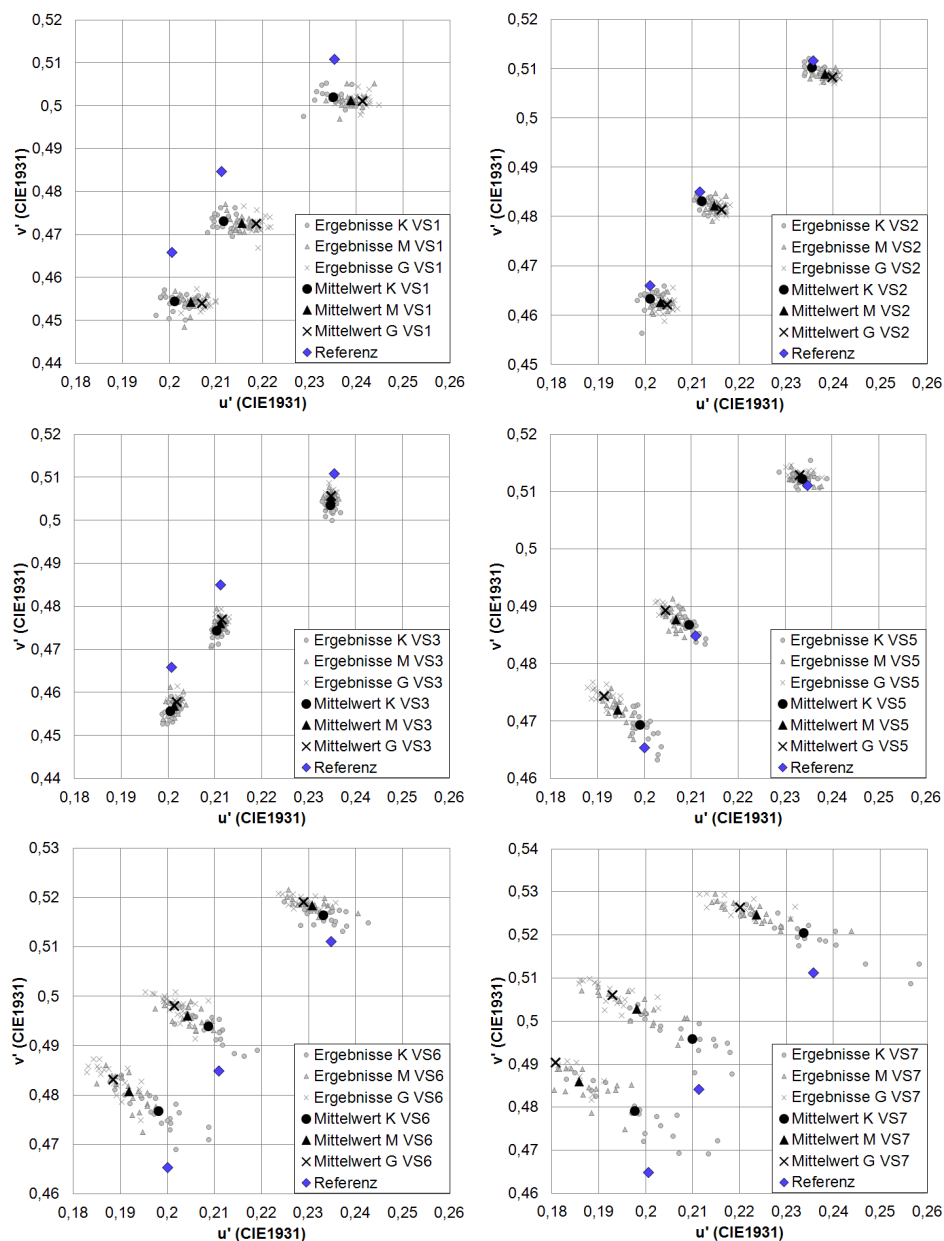


Abbildung A.9 – Mittelwerte der Abgleichergebnisse K, M, G für Versuchsszenarien VS1-VS3 und VS5-VS7.

A.5 Farbabstände $\Delta u'v'_{K-Referenz}$

Bei der Auswertung der Abgleichergebnisse K der Farbabgleichversuche aus Kapitel 4.1 wurden die Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE2006-2°, 2006-UP-2° und 2006-TUIL-2° auf ihre Fähigkeit getestet die visuell gleich wahrgenommenen Spektren auf denselben Farbort abzubilden. In Tabelle A.3 sind die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ aufgelistet, die sich unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K ergaben.

Tabelle A.3 – Mittelwerte der Farbabstände $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ und dazugehörige 1,96fache Standardfehler $\hat{\sigma}$ basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1931, den Spektralwertfunktionen CIE2006-2°, 2006-UP-2° und 2006-TUIL-2° für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K.

| | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 3500 K | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0089 | 0,0015 | 0,0075 | 0,0095 | 0,0015 | 0,0055 | 0,0097 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0010 | 0,0005 | 0,0008 | 0,0011 | 0,0009 | 0,0012 | 0,0030 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)}$ | 0,0034 | 0,0006 | 0,0037 | 0,0040 | 0,0007 | 0,0018 | 0,0038 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0004 | 0,0007 | 0,0010 | 0,0007 | 0,0010 | 0,0023 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-UP)}$ | 0,0035 | 0,0029 | 0,0013 | 0,0029 | 0,0009 | 0,0029 | 0,0049 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-UP)})$ | 0,0008 | 0,0010 | 0,0006 | 0,0011 | 0,0006 | 0,0008 | 0,0026 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)}$ | 0,0011 | 0,0005 | 0,0014 | 0,0009 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0024 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)})$ | 0,0006 | 0,0006 | 0,0006 | 0,0011 | 0,0007 | 0,0010 | 0,0031 |
| | 5000 K | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0116 | 0,0021 | 0,0108 | 0,0136 | 0,0022 | 0,0091 | 0,0119 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0009 | 0,0006 | 0,0009 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0020 | 0,0035 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)}$ | 0,0046 | 0,0008 | 0,0056 | 0,0048 | 0,0007 | 0,0029 | 0,0038 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0006 | 0,0008 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0016 | 0,0029 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-UP)}$ | 0,0037 | 0,0033 | 0,0018 | 0,0056 | 0,0020 | 0,0041 | 0,0083 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-UP)})$ | 0,0009 | 0,0009 | 0,0004 | 0,0014 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0039 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)}$ | 0,0010 | 0,0006 | 0,0025 | 0,0013 | 0,0012 | 0,0015 | 0,0042 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0005 | 0,0008 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0014 | 0,0040 |
| | 6500 K | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 0,0117 | 0,0029 | 0,0104 | 0,0165 | 0,0040 | 0,0116 | 0,0144 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE1931)})$ | 0,0009 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0019 | 0,0016 | 0,0021 | 0,0036 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)}$ | 0,0050 | 0,0013 | 0,0052 | 0,0059 | 0,0008 | 0,0032 | 0,0035 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)})$ | 0,0010 | 0,0009 | 0,0009 | 0,0017 | 0,0009 | 0,0015 | 0,0026 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-UP)}$ | 0,0030 | 0,0030 | 0,0019 | 0,0061 | 0,0039 | 0,0060 | 0,0088 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-UP)})$ | 0,0009 | 0,0010 | 0,0005 | 0,0016 | 0,0013 | 0,0018 | 0,0029 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)}$ | 0,0013 | 0,0006 | 0,0020 | 0,0013 | 0,0022 | 0,0021 | 0,0040 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-2^\circ)})$ | 0,0011 | 0,0007 | 0,0009 | 0,0013 | 0,0013 | 0,0018 | 0,0030 |

A.6 Farbabstände $\Delta u'v'_{G-Referenz}$

Bei der Auswertung der Abgleichergebnisse G der Farbabgleichversuche aus Kapitel 4.1 wurden die Spektralwertfunktionen CIE1964, CIE2006-10° und 2006-TUIL-10° auf ihre Fähigkeit getestet die visuell gleich wahrgenommenen Spektren auf denselben Farbort abzubilden. In Tabelle A.4 sind die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ aufgelistet, die sich unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K ergaben.

Tabelle A.4 – Mittelwerte der Farbabstände $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ und dazugehörige 1,96fache Standardfehler $\hat{\sigma}$ basierend auf den Normspektralwertfunktionen von 1964, den Spektralwertfunktionen CIE2006-10° und 2006-TUIL-10° für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K.

| | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 3500 K | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1964)}$ | 0,0048 | 0,0014 | 0,0040 | 0,0055 | 0,0012 | 0,0041 | 0,0052 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE1964)})$ | 0,0007 | 0,0004 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0008 | 0,0010 | 0,0018 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)}$ | 0,0037 | 0,0013 | 0,0033 | 0,0039 | 0,0014 | 0,0030 | 0,0032 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)})$ | 0,0007 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0009 | 0,0012 | 0,0020 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)}$ | 0,0019 | 0,0010 | 0,0005 | 0,0013 | 0,0014 | 0,0024 | 0,0036 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)})$ | 0,0007 | 0,0005 | 0,0003 | 0,0010 | 0,0008 | 0,0010 | 0,0012 |
| | 5000 K | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1964)}$ | 0,0059 | 0,0013 | 0,0055 | 0,0070 | 0,0006 | 0,0049 | 0,0057 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE1964)})$ | 0,0009 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0014 | 0,0015 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)}$ | 0,0044 | 0,0008 | 0,0046 | 0,0044 | 0,0005 | 0,0026 | 0,0023 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0014 | 0,0013 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)}$ | 0,0017 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0023 | 0,0015 | 0,0023 | 0,0043 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)})$ | 0,0009 | 0,0004 | 0,0004 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0015 |
| | 6500 K | | | | | | |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(1964)}$ | 0,0056 | 0,0015 | 0,0053 | 0,0081 | 0,0022 | 0,0061 | 0,0060 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(1964)})$ | 0,0006 | 0,0007 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0016 | 0,0023 |
| $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)}$ | 0,0041 | 0,0014 | 0,0043 | 0,0049 | 0,0012 | 0,0030 | 0,0024 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)})$ | 0,0007 | 0,0007 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0015 |
| $\Delta u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)}$ | 0,0017 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0032 | 0,0025 | 0,0032 | 0,0057 |
| $1,96 * \hat{\sigma}(u'v'_{K-Referenz(2006-TUIL-10^\circ)})$ | 0,0007 | 0,0005 | 0,0004 | 0,0017 | 0,0009 | 0,0017 | 0,0026 |

A.7 Abgleichergebnisse Probandin P23

Bei den Side-by-Side Untersuchungen aus Kapitel 4.1 wurde eine Probandin aus der Auswertung zur Ermittlung passender Spektralwertfunktionen ausgeschlossen, da bei ihr die Farbwahrnehmung im 2°-Beobachterfeld identisch mit der im 10°-Beobachterfeld ist. Abbildung A.10 zeigt die Abgleichergebnisse K, M und G der Probandin P23 für die Versuchsszenarien VS2, VS3 und VS6 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K.

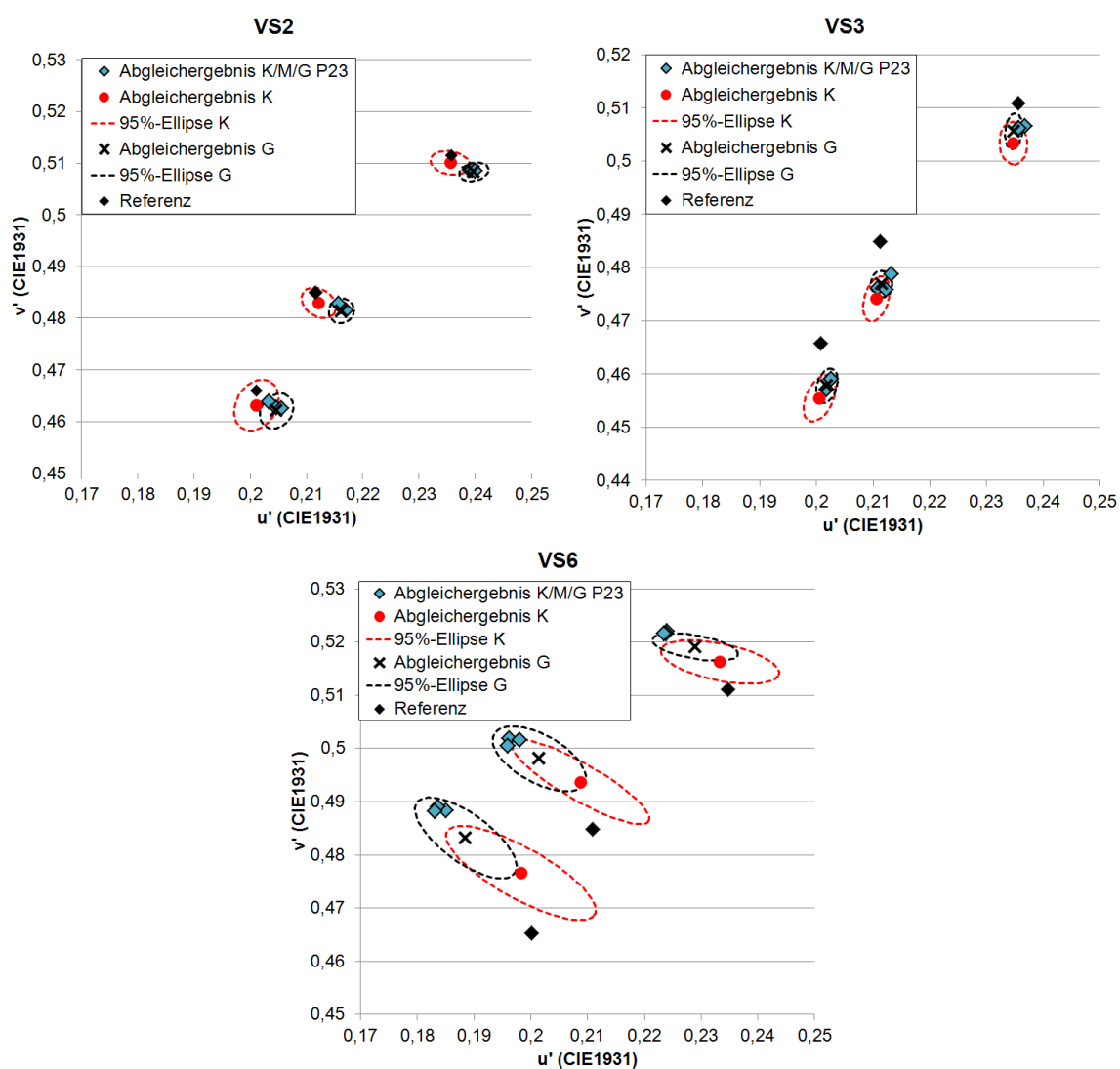


Abbildung A.10 – Abgleichergebnisse K, M, G der Probandin P23, mit Beobachterfeldgrößen unabhängiger Farbwahrnehmung, im Vergleich zu den Abgleichergebnissen der gesamten Probandengruppe bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K für die Versuchsszenarien VS2, VS3 und VS6.

A.8 t-Tests

Für die Überprüfung der Signifikanz der Verringerung der Farbraumfehler durch die Verwendung eines anderen Satzes Spektralwertfunktionen wurde die Nullhypothese mit einem t-Test überprüft. Die Nullhypothese besagt, dass sich die beiden Mittelwerte der untersuchten Farbdifferenzen nicht voneinander unterscheiden.

Nach Gleichung 3.19 aus Kapitel 3.8.1.4 wird der t-Wert der Nullhypothese ermittelt und der so errechnete Wert wird dem $t_{df,\alpha=0,05}$ -Wert aus der t-Tabelle gegenübergestellt, den der errechnete Wert nicht überschreiten darf, wenn die Nullhypothese bestätigt werden soll. Ist der t-Wert betragsmäßig größer als der tabellierte t-Wert $t_{df,\alpha=0,05}$, so kann davon ausgegangen werden, dass die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p kleiner als $\alpha = 0,05$ abzulehnen ist. Damit gilt also die gerichtete Hypothese H_1 als bestätigt. Tabelle A.5 zeigt die Ergebnisse der t-Wertberechnungen für Farbbewertungen im 2°-Beobachterfeld. Tabelle A.6 zeigt die errechneten t-Werte für die Farbbewertungen im 10°-Beobachterfeld. Der tabellierte t-Wert aus der t-Tabelle [Bor05](S.819) liegt bei $t_{df,\alpha=0,05} = 1,645$.

Tabelle A.5 – Errechnete t-Werte für den Test der Verringerung der Farbraumfehler durch die Verwendung besserer Spektralwertfunktionen für die Farbbewertung im 2°-Beobachterfeld auf Signifikanz. Fett gedruckte Werte zeigen eine signifikante Verringerung der Farbraumfehler.

| | CCT | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|---|--------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| $t_{CIE1931-CIE2006-2^\circ}$ | 3500 K | 8,04 | 2,88 | 6,99 | 7,32 | 1,42 | 4,64 | 3,06 |
| | 5000 K | 10,4 | 3 | 8,42 | 8,74 | 2,17 | 4,68 | 3,51 |
| | 6500 K | 9,63 | 2,27 | 8,33 | 8,23 | 3,51 | 6,28 | 4,78 |
| $t_{CIE1931-2006TUILL-2^\circ}$ | 3500 K | 10,39 | 3 | 11,79 | 11,07 | 1,63 | 5,26 | 3,3 |
| | 5000 K | 15,95 | 3,84 | 13,72 | 13 | 1,5 | 6,03 | 2,83 |
| | 6500 K | 14,3 | 3,58 | 13,28 | 12,88 | 1,69 | 6,72 | 4,35 |
| $t_{2006TUILL-2^\circ-CIE2006-2^\circ}$ | 3500 K | 3,12 | 0,28 | 4,61 | 4,05 | 0,24 | 0,68 | 0,69 |
| | 5000 K | 5,55 | 0,52 | 5,28 | 3,81 | -1,17 | 1,34 | -0,19 |
| | 6500 K | 5,05 | 1,12 | 4,98 | 4,26 | -1,75 | 0,91 | -0,24 |

Tabelle A.6 – Errechnete t-Werte für den Test der Verringerung der Farbraumfehler durch die Verwendung besserer Spektralwertfunktionen für die Farbbewertung im 10°-Beobachterfeld auf Signifikanz. Fett gedruckte Werte zeigen eine signifikante Verringerung der Farbraumfehler.

| | CCT | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|---|--------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| $t_{CIE1964-CIE2006-10^\circ}$ | 3500 K | 2,17 | 0,38 | 1,39 | 3,03 | -0,33 | 1,29 | 1,45 |
| | 5000 K | 2,24 | 1,38 | 2,71 | 3,02 | 0,40 | 2,20 | 3,41 |
| | 6500 K | 3,05 | 0,20 | 2,17 | 3,14 | 2,04 | 2,69 | 2,60 |
| $t_{CIE1964-2006TUILL-10^\circ}$ | 3500 K | 5,65 | 1,28 | 9,16 | 6,69 | -0,34 | 2,19 | 1,46 |
| | 5000 K | 6,50 | 2,91 | 15,36 | 5,34 | -2,50 | 2,83 | 1,38 |
| | 6500 K | 7,94 | 0,74 | 12,54 | 4,41 | -0,61 | 2,43 | 0,18 |
| $t_{2006TUILL-10^\circ-CIE2006-10^\circ}$ | 3500 K | 3,47 | 0,83 | 7,07 | 4,23 | -0,01 | 0,78 | -0,31 |
| | 5000 K | 4,13 | 1,25 | 12,13 | 2,36 | -2,79 | 0,30 | -1,97 |
| | 6500 K | 4,74 | 0,50 | 9,90 | 1,64 | -2,36 | -0,13 | -2,17 |

Tabelle A.7 – 95%-Perzentile der Farbabstände $u'v'_{K-Referenz}$ zur Überprüfung, unter welchem Wert die Farbraumfehler mit 95%iger Sicherheit liegen.

| CCT | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}(95\%)$ | | | | | | | |
| 3500 K | 0,0098 | 0,0019 | 0,0082 | 0,0104 | 0,0023 | 0,0065 | 0,0125 |
| 5000 K | 0,0124 | 0,0026 | 0,0116 | 0,0149 | 0,0032 | 0,0110 | 0,0151 |
| 6500 K | 0,0125 | 0,0038 | 0,0111 | 0,0182 | 0,0054 | 0,0134 | 0,0178 |
| $u'v'_{K-Referenz(CIE2006-2^\circ)}(95\%)$ | | | | | | | |
| 3500 K | 0,0043 | 0,0010 | 0,0044 | 0,0049 | 0,0013 | 0,0027 | 0,0061 |
| 5000 K | 0,0054 | 0,0013 | 0,0064 | 0,0059 | 0,0014 | 0,0045 | 0,0066 |
| 6500 K | 0,0059 | 0,0021 | 0,0059 | 0,0073 | 0,0016 | 0,0048 | 0,0061 |
| $u'v'_{K-Referenz(2006-TUILL-2^\circ)}(95\%)$ | | | | | | | |
| 3500 K | 0,0021 | 0,0010 | 0,0020 | 0,0019 | 0,0012 | 0,0022 | 0,0056 |
| 5000 K | 0,0018 | 0,0010 | 0,0032 | 0,0024 | 0,0017 | 0,0029 | 0,0082 |
| 6500 K | 0,0023 | 0,0013 | 0,0028 | 0,0025 | 0,0033 | 0,0038 | 0,0070 |

Tabelle A.8 – 95%-Perzentile der Farbabstände $u'v'_{G-Referenz}$ zur Überprüfung, unter welchem Wert die Farbraumfehler mit 95%iger Sicherheit liegen.

| CCT | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $u'v'_{G-Referenz(CIE1964)}(95\%)$ | | | | | | | |
| 3500 K | 0,0054 | 0,0018 | 0,0045 | 0,0061 | 0,0019 | 0,0050 | 0,0068 |
| 5000 K | 0,0066 | 0,0017 | 0,0060 | 0,0080 | 0,0010 | 0,0061 | 0,0070 |
| 6500 K | 0,0061 | 0,0021 | 0,0059 | 0,0094 | 0,0027 | 0,0075 | 0,0081 |
| $u'v'_{G-Referenz(CIE2006-10^\circ)}(95\%)$ | | | | | | | |
| 3500 K | 0,0043 | 0,0017 | 0,0039 | 0,0045 | 0,0022 | 0,0041 | 0,0050 |
| 5000 K | 0,0052 | 0,0013 | 0,0050 | 0,0054 | 0,0009 | 0,0038 | 0,0035 |
| 6500 K | 0,0047 | 0,0021 | 0,0049 | 0,0060 | 0,0018 | 0,0044 | 0,0038 |
| $u'v'_{G-Referenz(2006-TUILL-10^\circ)}(95\%)$ | | | | | | | |
| 3500 K | 0,0024 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0022 | 0,0021 | 0,0033 | 0,0047 |
| 5000 K | 0,0024 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0022 | 0,0021 | 0,0033 | 0,0047 |
| 6500 K | 0,0023 | 0,0017 | 0,0009 | 0,0046 | 0,0033 | 0,0047 | 0,0080 |

A.9 Wilcoxon-Tests

Um bei den Farbdifferenzbewertungen aus Kapitel 4.2 und 4.3 überprüfen zu können, ob der wahrgenommene Farbabstand zwischen den beiden Testspektren, durch die Verwendung eines anderen Satzes Spektralwertfunktionen, signifikant verringert werden konnte, wurden Wilcoxon-Tests durchgeführt. Die zu testende Nullhypothese H_0 besagt, dass die beiden Stichproben aus Populationen stammen, die sich in ihrer zentralen Tendenz nicht unterscheiden. Die Rechenschritte zur Ermittlung der T- und T'-Werte sind in Kapitel 3.8.2.1 zu finden. Hier sind die Tabellen mit den T- und T'-Werten und den dazugehörigen kritischen T-Werten für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,025$ dargestellt. Ist der angegebene T-Wert kleiner als der dazugehörige kritische T-Wert, kann die Nullhypothese abgelehnt werden. Das bedeutet die zentralen Tendenzen der beiden untersuchten Stichproben unterscheiden sich signifikant. Die wahrgenommene Farbdifferenz kann demnach durch die Verwendung neuer Spektralwertfunktionen signifikant verringert werden.

A.9.1 Farbdifferenzbewertungen: Lichtfarbensatz 1

Die Tabellen A.9 bis A.14 zeigen die T- und T'-Werte für die Überprüfung der Nullhypothese mit Hilfe der Wilcoxon-Tests für die Farbdifferenzbewertungen aus Kapitel 4.2. Es wurde überprüft, ob die Farbdifferenz zwischen den Testspektren von den Probanden unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° und 2006-TUIL-2°/10° signifikant geringer wahrgenommen wurde als unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen CIE1931 und CIE1964. Außerdem wurde überprüft, ob die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° zu signifikant besseren Ergebnissen führen als die Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10°. Die Anzahl der in die Auswertung eingehenden Paardifferenzen (m) variiert, da nur die Paardifferenzen in die Auswertung eingehen, die keine Nulldifferenzen darstellen.

Tabelle A.9 – $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | CCT | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|--------|---------|-------------|----|--|
| VS1 | 3500 K | 181,5 | 5,5 | 17 | 35 |
| VS1 | 5000 K | 169 | 0 | 13 | 17 |
| VS1 | 6500 K | 180 | 0 | 15 | 25 |
| VS2 | 3500 K | 40 | 114 | 11 | 11 |
| VS2 | 5000 K | 122 | 13 | 9 | 6 |
| VS2 | 6500 K | 115,5 | 38,5 | 11 | 11 |
| VS3 | 3500 K | 179 | 8 | 17 | 35 |
| VS3 | 5000 K | 177 | 10 | 17 | 35 |
| VS3 | 6500 K | 172,5 | 7,5 | 15 | 25 |
| VS4 | 3500 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS4 | 5000 K | 182 | 5 | 17 | 35 |
| VS4 | 6500 K | 185,5 | 3,5 | 18 | 40 |
| VS5 | 3500 K | 84,5 | 14,5 | 6 | 0 |
| VS5 | 5000 K | 46 | 89 | 9 | 6 |
| VS5 | 6500 K | 140 | 29 | 13 | 17 |
| VS6 | 3500 K | 167,5 | 19,5 | 17 | 35 |
| VS6 | 5000 K | 180 | 10,5 | 19 | 46 |
| VS6 | 6500 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS7 | 3500 K | 173,5 | 10,5 | 16 | 30 |
| VS7 | 5000 K | 178,5 | 10,5 | 18 | 40 |
| VS7 | 6500 K | 184 | 0 | 16 | 30 |

Tabelle A.10 – $\Delta E_{sub}(2006 - TUILL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | CCT | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|--------|---------|-------------|----|--|
| VS1 | 3500 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS1 | 5000 K | 187 | 0 | 17 | 35 |
| VS1 | 6500 K | 187 | 0 | 17 | 35 |
| VS2 | 3500 K | 45 | 113 | 13 | 17 |
| VS2 | 5000 K | 119 | 56 | 14 | 21 |
| VS2 | 6500 K | 158,5 | 25,5 | 16 | 35 |
| VS3 | 3500 K | 189 | 0 | 18 | 40 |
| VS3 | 5000 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS3 | 6500 K | 189 | 0 | 18 | 40 |
| VS4 | 3500 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS4 | 5000 K | 185 | 5 | 19 | 46 |
| VS4 | 6500 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS5 | 3500 K | 75 | 70 | 10 | 8 |
| VS5 | 5000 K | 62 | 118 | 15 | 25 |
| VS5 | 6500 K | 129,5 | 45,5 | 14 | 21 |
| VS6 | 3500 K | 181 | 8 | 18 | 40 |
| VS6 | 5000 K | 183,5 | 3,5 | 17 | 35 |
| VS6 | 6500 K | 187 | 2 | 18 | 40 |
| VS7 | 3500 K | 169,5 | 14,5 | 16 | 30 |
| VS7 | 5000 K | 183 | 6 | 18 | 40 |
| VS7 | 6500 K | 187 | 0 | 17 | 35 |

Tabelle A.11 – $\Delta E_{sub}(2006 - TU1L - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | CCT | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|--------|---------|-------------|----|--|
| VS1 | 3500 K | 190 | 0 | 19 | 46 |
| VS1 | 5000 K | 172,5 | 7,5 | 15 | 25 |
| VS1 | 6500 K | 153,5 | 26,5 | 15 | 25 |
| VS2 | 3500 K | 89,5 | 79,5 | 13 | 17 |
| VS2 | 5000 K | 77 | 85 | 12 | 14 |
| VS2 | 6500 K | 123 | 31 | 11 | 11 |
| VS3 | 3500 K | 173,5 | 10,5 | 16 | 30 |
| VS3 | 5000 K | 172,5 | 11,5 | 16 | 30 |
| VS3 | 6500 K | 172 | 8 | 15 | 25 |
| VS4 | 3500 K | 168,5 | 15,5 | 16 | 30 |
| VS4 | 5000 K | 175,5 | 11,5 | 17 | 35 |
| VS4 | 6500 K | 159 | 16 | 14 | 21 |
| VS5 | 3500 K | 14,5 | 97,5 | 7 | 2 |
| VS5 | 5000 K | 56,5 | 78,5 | 9 | 6 |
| VS5 | 6500 K | 75 | 49 | 8 | 4 |
| VS6 | 3500 K | 130 | 32 | 12 | 14 |
| VS6 | 5000 K | 125,5 | 28,5 | 11 | 11 |
| VS6 | 6500 K | 110,5 | 63 | 14 | 25 |
| VS7 | 3500 K | 103 | 59 | 12 | 14 |
| VS7 | 5000 K | 99,5 | 62,5 | 12 | 14 |
| VS7 | 6500 K | 99,5 | 45,5 | 10 | 8 |

Tabelle A.12 – $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | CCT | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|--------|---------|------------|----|--|
| VS1 | 3500 K | 127 | 48 | 14 | 21 |
| VS1 | 5000 K | 129 | 25 | 11 | 11 |
| VS1 | 6500 K | 134,5 | 34,5 | 13 | 17 |
| VS2 | 3500 K | 105,5 | 18,5 | 8 | 4 |
| VS2 | 5000 K | 66 | 96 | 12 | 14 |
| VS2 | 6500 K | 71,5 | 90,5 | 12 | 14 |
| VS3 | 3500 K | 115 | 54 | 13 | 17 |
| VS3 | 5000 K | 138 | 24 | 12 | 14 |
| VS3 | 6500 K | 166 | 9 | 14 | 21 |
| VS4 | 3500 K | 175 | 0 | 14 | 21 |
| VS4 | 5000 K | 167 | 8 | 14 | 21 |
| VS4 | 6500 K | 163 | 12 | 14 | 21 |
| VS5 | 3500 K | 49,5 | 49,5 | 6 | 0 |
| VS5 | 5000 K | 60 | 85 | 10 | 8 |
| VS5 | 6500 K | 87 | 37 | 8 | 4 |
| VS6 | 3500 K | 169 | 0 | 13 | 17 |
| VS6 | 5000 K | 163 | 21 | 16 | 30 |
| VS6 | 6500 K | 187 | 0 | 17 | 35 |
| VS7 | 3500 K | 151 | 11 | 12 | 14 |
| VS7 | 5000 K | 172,5 | 7,5 | 15 | 25 |
| VS7 | 6500 K | 184 | 0 | 16 | 30 |

Tabelle A.13 – $\Delta E_{sub}(2006 - TU11 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | CCT | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|--------|---------|-------------|----|--|
| VS1 | 3500 K | 171 | 18 | 18 | 40 |
| VS1 | 5000 K | 174 | 15 | 18 | 40 |
| VS1 | 6500 K | 170 | 17 | 17 | 35 |
| VS2 | 3500 K | 137 | 17 | 11 | 11 |
| VS2 | 5000 K | 43,5 | 136,5 | 15 | 25 |
| VS2 | 6500 K | 61 | 84 | 10 | 8 |
| VS3 | 3500 K | 186 | 3 | 18 | 40 |
| VS3 | 5000 K | 189 | 0 | 18 | 40 |
| VS3 | 6500 K | 184 | 5 | 18 | 40 |
| VS4 | 3500 K | 173 | 16 | 18 | 40 |
| VS4 | 5000 K | 170,5 | 16,5 | 17 | 35 |
| VS4 | 6500 K | 171,5 | 15,5 | 17 | 35 |
| VS5 | 3500 K | 42 | 103 | 10 | 8 |
| VS5 | 5000 K | 44 | 110 | 11 | 11 |
| VS5 | 6500 K | 104 | 71 | 14 | 21 |
| VS6 | 3500 K | 179,5 | 4,5 | 16 | 30 |
| VS6 | 5000 K | 181 | 6 | 17 | 35 |
| VS6 | 6500 K | 182 | 5 | 17 | 35 |
| VS7 | 3500 K | 150 | 37 | 17 | 35 |
| VS7 | 5000 K | 153 | 34 | 17 | 35 |
| VS7 | 6500 K | 180 | 0 | 15 | 25 |

Tabelle A.14 – $\Delta E_{sub}(2006 - TU11 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | CCT | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|--------|---------|-------------|----|--|
| VS1 | 3500 K | 162,5 | 21,5 | 16 | 30 |
| VS1 | 5000 K | 158,5 | 25,5 | 16 | 30 |
| VS1 | 6500 K | 144 | 36 | 15 | 25 |
| VS2 | 3500 K | 93 | 31 | 8 | 4 |
| VS2 | 5000 K | 19 | 126 | 10 | 8 |
| VS2 | 6500 K | 48 | 51 | 6 | 0 |
| VS3 | 3500 K | 178,5 | 11,5 | 19 | 46 |
| VS3 | 5000 K | 181,5 | 8,5 | 19 | 46 |
| VS3 | 6500 K | 164 | 23 | 17 | 35 |
| VS4 | 3500 K | 123,5 | 56,5 | 15 | 25 |
| VS4 | 5000 K | 146 | 34 | 15 | 25 |
| VS4 | 6500 K | 139 | 48 | 17 | 35 |
| VS5 | 3500 K | 42 | 103 | 10 | 8 |
| VS5 | 5000 K | 18,5 | 66,5 | 5 | 0 |
| VS5 | 6500 K | 98 | 77 | 14 | 21 |
| VS6 | 3500 K | 144,5 | 35,5 | 15 | 25 |
| VS6 | 5000 K | 104 | 65 | 13 | 17 |
| VS6 | 6500 K | 136,5 | 44 | 15 | 25 |
| VS7 | 3500 K | 102 | 78 | 15 | 25 |
| VS7 | 5000 K | 100 | 84 | 16 | 30 |
| VS7 | 6500 K | 129 | 55 | 16 | 30 |

A.9.2 Farbdifferenzbewertungen: Lichtfarbensatz 2

Die Tabellen A.15 bis A.20 zeigen die T- und T'-Werte für die Überprüfung der Nullhypothese mit Hilfe der Wilcoxon-Tests für die Farbdifferenzbewertungen aus Kapitel 4.3. Es wurde überprüft, ob die Farbdifferenz zwischen den Testspektren von den Probanden unter Verwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° und 2006-TUIL-2°/10° als signifikant geringer wahrgenommen wurde als unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen CIE1931 und CIE1964. Außerdem wurde überprüft, ob die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° zu signifikant besseren Ergebnissen führen als die Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10°.

Tabelle A.15 – $\Delta E_{sub}(CIE2006-2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | Testfarbe | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|-----------|---------|-------------|----|---|
| VS1 | TF1 | 152 | 13 | 15 | 25 |
| VS1 | TF2 | 168 | 0 | 16 | 30 |
| VS1 | TF3 | 135,5 | 32,5 | 16 | 30 |
| VS1 | TF4 | 140 | 10 | 12 | 14 |
| VS1 | TF5 | 171 | 0 | 18 | 40 |
| VS8 | TF1 | 165 | 0 | 15 | 25 |
| VS8 | TF2 | 121 | 40 | 14 | 21 |
| VS8 | TF3 | 56,5 | 69,5 | 9 | 6 |
| VS8 | TF4 | 107 | 36 | 11 | 11 |
| VS8 | TF5 | 161 | 0 | 14 | 21 |
| VS9 | TF1 | 161 | 0 | 14 | 21 |
| VS9 | TF2 | 165 | 0 | 15 | 25 |
| VS9 | TF3 | 160 | 8 | 16 | 30 |
| VS9 | TF4 | 147,5 | 22,5 | 17 | 35 |
| VS9 | TF5 | 163,5 | 4,5 | 16 | 30 |

Tabelle A.16 – $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | Testfarbe | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|-----------|---------|-------------|----|---|
| VS1 | TF1 | 163,5 | 7,5 | 18 | 40 |
| VS1 | TF2 | 165 | 0 | 15 | 25 |
| VS1 | TF3 | 156 | 0 | 13 | 17 |
| VS1 | TF4 | 136,5 | 33,5 | 17 | 35 |
| VS1 | TF5 | 171 | 0 | 18 | 40 |
| VS8 | TF1 | 170 | 0 | 17 | 35 |
| VS8 | TF2 | 148 | 8 | 13 | 17 |
| VS8 | TF3 | 110,5 | 15,5 | 9 | 6 |
| VS8 | TF4 | 158 | 7 | 15 | 25 |
| VS8 | TF5 | 165,5 | 5,5 | 18 | 40 |
| VS9 | TF1 | 170 | 0 | 17 | 35 |
| VS9 | TF2 | 168 | 3 | 18 | 40 |
| VS9 | TF3 | 166,5 | 3,5 | 17 | 35 |
| VS9 | TF4 | 160 | 8 | 16 | 30 |
| VS9 | TF5 | 168 | 0 | 16 | 30 |

Tabelle A.17 – $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | Testfarbe | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|-----------|---------|-------------|----|---|
| VS1 | TF1 | 150 | 0 | 12 | 14 |
| VS1 | TF2 | 123,5 | 41,5 | 15 | 25 |
| VS1 | TF3 | 122,5 | 33,5 | 13 | 17 |
| VS1 | TF4 | 75 | 75 | 12 | 14 |
| VS1 | TF5 | 121 | 22 | 11 | 11 |
| VS8 | TF1 | 133 | 32 | 15 | 25 |
| VS8 | TF2 | 123,5 | 26,5 | 12 | 14 |
| VS8 | TF3 | 138,5 | 11,5 | 12 | 14 |
| VS8 | TF4 | 141 | 24 | 15 | 25 |
| VS8 | TF5 | 134,5 | 33,5 | 16 | 30 |
| VS9 | TF1 | 165 | 0 | 15 | 25 |
| VS9 | TF2 | 145,5 | 22,5 | 16 | 30 |
| VS9 | TF3 | 103,5 | 52,5 | 13 | 17 |
| VS9 | TF4 | 133 | 23 | 13 | 17 |
| VS9 | TF5 | 148,5 | 19,5 | 16 | 30 |

Tabelle A.18 – $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | Testfarbe | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|-----------|---------|-----------|----|---|
| VS1 | TF1 | 139 | 17 | 13 | 17 |
| VS1 | TF2 | 168 | 0 | 16 | 30 |
| VS1 | TF3 | 102,5 | 13,5 | 8 | 4 |
| VS1 | TF4 | 103 | 40 | 11 | 11 |
| VS1 | TF5 | 150 | 0 | 12 | 14 |
| VS8 | TF1 | 126 | 0 | 9 | 6 |
| VS8 | TF2 | 50 | 93 | 11 | 11 |
| VS8 | TF3 | 56 | 70 | 9 | 6 |
| VS8 | TF4 | 90 | 60 | 12 | 14 |
| VS8 | TF5 | 94,5 | 48,5 | 11 | 11 |
| VS9 | TF1 | 137 | 19 | 13 | 17 |
| VS9 | TF2 | 150 | 0 | 12 | 14 |
| VS9 | TF3 | 165 | 0 | 15 | 25 |
| VS9 | TF4 | 171 | 0 | 18 | 40 |
| VS9 | TF5 | 156 | 0 | 13 | 17 |

Tabelle A.19 – $\Delta E_{sub}(2006 - TU11 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | Testfarbe | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|-----------|---------|-------------|----|---|
| VS1 | TF1 | 153 | 18 | 18 | 40 |
| VS1 | TF2 | 152,5 | 17,5 | 17 | 35 |
| VS1 | TF3 | 140,5 | 24,5 | 15 | 25 |
| VS1 | TF4 | 97 | 64 | 14 | 21 |
| VS1 | TF5 | 144,5 | 26,5 | 18 | 40 |
| VS8 | TF1 | 153,5 | 17,5 | 18 | 40 |
| VS8 | TF2 | 103 | 13 | 8 | 4 |
| VS8 | TF3 | 91 | 14 | 7 | 2 |
| VS8 | TF4 | 156 | 9 | 15 | 25 |
| VS8 | TF5 | 134,5 | 30,5 | 15 | 25 |
| VS9 | TF1 | 162 | 9 | 18 | 40 |
| VS9 | TF2 | 154,5 | 13,5 | 16 | 30 |
| VS9 | TF3 | 160,5 | 9,5 | 17 | 35 |
| VS9 | TF4 | 163,5 | 4,5 | 16 | 30 |
| VS9 | TF5 | 149 | 16 | 15 | 25 |

Tabelle A.20 – $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ)$. T- und T'-Werte mit zugehörigen kritischen T-Werten ($\alpha = 0,025$) für Wilcoxon-Test

| Versuchsszenario | Testfarbe | T'-Wert | T-Wert | m | kritischer T-Wert ($\alpha = 0,025$) |
|------------------|-----------|---------|-----------|----|---|
| VS1 | TF1 | 122 | 39 | 14 | 21 |
| VS1 | TF2 | 133,5 | 34,5 | 16 | 30 |
| VS1 | TF3 | 120 | 36 | 13 | 17 |
| VS1 | TF4 | 54,5 | 71,5 | 9 | 6 |
| VS1 | TF5 | 103 | 58 | 14 | 21 |
| VS8 | TF1 | 146 | 24 | 17 | 35 |
| VS8 | TF2 | 143 | 0 | 11 | 11 |
| VS8 | TF3 | 125 | 25 | 12 | 14 |
| VS8 | TF4 | 143 | 0 | 11 | 11 |
| VS8 | TF5 | 122,5 | 45,5 | 16 | 30 |
| VS9 | TF1 | 154 | 16 | 17 | 35 |
| VS9 | TF2 | 133 | 32 | 15 | 25 |
| VS9 | TF3 | 100 | 43 | 11 | 11 |
| VS9 | TF4 | 99 | 44 | 11 | 11 |
| VS9 | TF5 | 140 | 28 | 16 | 30 |

A.9.3 Spektralwertfunktionen 2006-TUIL

Tabellarische Angabe der in dieser Arbeit entwickelten Spektralwertfunktionen 2006-TUIL für ein 2°-Beobachterfeld (A.21) und für ein 10°-Beobachterfeld (A.22) in einer Schrittweite von 1nm.

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten.

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 390 | 7,735E-03 | 5,207E-04 | 3,981E-02 |
| 391 | 8,873E-03 | 6,564E-04 | 4,549E-02 |
| 392 | 1,001E-02 | 7,920E-04 | 5,118E-02 |
| 393 | 1,241E-02 | 9,276E-04 | 6,368E-02 |
| 394 | 1,481E-02 | 1,063E-03 | 7,619E-02 |
| 395 | 1,721E-02 | 1,199E-03 | 8,869E-02 |
| 396 | 1,969E-02 | 1,478E-03 | 1,012E-01 |
| 397 | 2,216E-02 | 1,756E-03 | 1,137E-01 |
| 398 | 2,715E-02 | 2,035E-03 | 1,398E-01 |
| 399 | 3,213E-02 | 2,314E-03 | 1,659E-01 |
| 400 | 3,712E-02 | 2,592E-03 | 1,919E-01 |
| 401 | 4,222E-02 | 3,118E-03 | 2,180E-01 |
| 402 | 4,732E-02 | 3,644E-03 | 2,441E-01 |
| 403 | 5,567E-02 | 4,169E-03 | 2,877E-01 |
| 404 | 6,401E-02 | 4,695E-03 | 3,313E-01 |
| 405 | 7,235E-02 | 5,220E-03 | 3,749E-01 |
| 406 | 8,080E-02 | 6,073E-03 | 4,185E-01 |
| 407 | 8,925E-02 | 6,926E-03 | 4,621E-01 |
| 408 | 1,004E-01 | 7,778E-03 | 5,200E-01 |
| 409 | 1,115E-01 | 8,631E-03 | 5,780E-01 |
| 410 | 1,226E-01 | 9,484E-03 | 6,359E-01 |
| 411 | 1,335E-01 | 1,056E-02 | 6,939E-01 |
| 412 | 1,445E-01 | 1,163E-02 | 7,519E-01 |
| 413 | 1,564E-01 | 1,270E-02 | 8,151E-01 |
| 414 | 1,683E-01 | 1,377E-02 | 8,782E-01 |
| 415 | 1,802E-01 | 1,484E-02 | 9,414E-01 |
| 416 | 1,918E-01 | 1,607E-02 | 1,005E+00 |
| 417 | 2,035E-01 | 1,730E-02 | 1,068E+00 |
| 418 | 2,128E-01 | 1,852E-02 | 1,118E+00 |
| 419 | 2,222E-01 | 1,975E-02 | 1,169E+00 |
| 420 | 2,315E-01 | 2,098E-02 | 1,220E+00 |
| 421 | 2,404E-01 | 2,217E-02 | 1,270E+00 |
| 422 | 2,493E-01 | 2,336E-02 | 1,321E+00 |
| 423 | 2,580E-01 | 2,455E-02 | 1,370E+00 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 424 | 2,667E-01 | 2,575E-02 | 1,420E+00 |
| 425 | 2,753E-01 | 2,694E-02 | 1,469E+00 |
| 426 | 2,838E-01 | 2,839E-02 | 1,519E+00 |
| 427 | 2,922E-01 | 2,983E-02 | 1,568E+00 |
| 428 | 2,986E-01 | 3,128E-02 | 1,607E+00 |
| 429 | 3,049E-01 | 3,272E-02 | 1,645E+00 |
| 430 | 3,113E-01 | 3,417E-02 | 1,683E+00 |
| 431 | 3,172E-01 | 3,586E-02 | 1,722E+00 |
| 432 | 3,231E-01 | 3,756E-02 | 1,760E+00 |
| 433 | 3,281E-01 | 3,926E-02 | 1,793E+00 |
| 434 | 3,330E-01 | 4,096E-02 | 1,826E+00 |
| 435 | 3,380E-01 | 4,266E-02 | 1,859E+00 |
| 436 | 3,428E-01 | 4,443E-02 | 1,893E+00 |
| 437 | 3,477E-01 | 4,620E-02 | 1,926E+00 |
| 438 | 3,463E-01 | 4,797E-02 | 1,925E+00 |
| 439 | 3,449E-01 | 4,974E-02 | 1,924E+00 |
| 440 | 3,435E-01 | 5,152E-02 | 1,923E+00 |
| 441 | 3,421E-01 | 5,294E-02 | 1,923E+00 |
| 442 | 3,407E-01 | 5,436E-02 | 1,922E+00 |
| 443 | 3,366E-01 | 5,578E-02 | 1,907E+00 |
| 444 | 3,326E-01 | 5,721E-02 | 1,892E+00 |
| 445 | 3,285E-01 | 5,863E-02 | 1,877E+00 |
| 446 | 3,246E-01 | 6,009E-02 | 1,863E+00 |
| 447 | 3,206E-01 | 6,155E-02 | 1,848E+00 |
| 448 | 3,125E-01 | 6,301E-02 | 1,810E+00 |
| 449 | 3,044E-01 | 6,447E-02 | 1,773E+00 |
| 450 | 2,962E-01 | 6,592E-02 | 1,736E+00 |
| 451 | 2,883E-01 | 6,746E-02 | 1,699E+00 |
| 452 | 2,805E-01 | 6,900E-02 | 1,661E+00 |
| 453 | 2,741E-01 | 7,054E-02 | 1,632E+00 |
| 454 | 2,678E-01 | 7,207E-02 | 1,604E+00 |
| 455 | 2,615E-01 | 7,361E-02 | 1,575E+00 |
| 456 | 2,548E-01 | 7,619E-02 | 1,546E+00 |
| 457 | 2,480E-01 | 7,876E-02 | 1,517E+00 |
| 458 | 2,431E-01 | 8,133E-02 | 1,498E+00 |
| 459 | 2,381E-01 | 8,391E-02 | 1,479E+00 |
| 460 | 2,332E-01 | 8,648E-02 | 1,460E+00 |
| 461 | 2,279E-01 | 9,069E-02 | 1,441E+00 |
| 462 | 2,227E-01 | 9,490E-02 | 1,422E+00 |
| 463 | 2,144E-01 | 9,911E-02 | 1,386E+00 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 464 | 2,061E-01 | 1,033E-01 | 1,351E+00 |
| 465 | 1,979E-01 | 1,075E-01 | 1,315E+00 |
| 466 | 1,898E-01 | 1,124E-01 | 1,280E+00 |
| 467 | 1,817E-01 | 1,172E-01 | 1,244E+00 |
| 468 | 1,710E-01 | 1,220E-01 | 1,194E+00 |
| 469 | 1,602E-01 | 1,268E-01 | 1,144E+00 |
| 470 | 1,494E-01 | 1,316E-01 | 1,093E+00 |
| 471 | 1,394E-01 | 1,364E-01 | 1,043E+00 |
| 472 | 1,294E-01 | 1,411E-01 | 9,929E-01 |
| 473 | 1,197E-01 | 1,459E-01 | 9,443E-01 |
| 474 | 1,099E-01 | 1,507E-01 | 8,957E-01 |
| 475 | 1,002E-01 | 1,554E-01 | 8,471E-01 |
| 476 | 9,104E-02 | 1,605E-01 | 7,985E-01 |
| 477 | 8,186E-02 | 1,656E-01 | 7,499E-01 |
| 478 | 7,455E-02 | 1,707E-01 | 7,113E-01 |
| 479 | 6,724E-02 | 1,758E-01 | 6,728E-01 |
| 480 | 5,993E-02 | 1,809E-01 | 6,343E-01 |
| 481 | 5,304E-02 | 1,864E-01 | 5,958E-01 |
| 482 | 4,614E-02 | 1,920E-01 | 5,573E-01 |
| 483 | 4,079E-02 | 1,975E-01 | 5,271E-01 |
| 484 | 3,544E-02 | 2,031E-01 | 4,970E-01 |
| 485 | 3,009E-02 | 2,087E-01 | 4,668E-01 |
| 486 | 2,531E-02 | 2,150E-01 | 4,366E-01 |
| 487 | 2,052E-02 | 2,213E-01 | 4,064E-01 |
| 488 | 1,767E-02 | 2,276E-01 | 3,867E-01 |
| 489 | 1,482E-02 | 2,340E-01 | 3,670E-01 |
| 490 | 1,197E-02 | 2,403E-01 | 3,472E-01 |
| 491 | 9,472E-03 | 2,498E-01 | 3,275E-01 |
| 492 | 6,977E-03 | 2,592E-01 | 3,077E-01 |
| 493 | 5,457E-03 | 2,687E-01 | 2,933E-01 |
| 494 | 3,936E-03 | 2,782E-01 | 2,788E-01 |
| 495 | 2,415E-03 | 2,877E-01 | 2,643E-01 |
| 496 | 1,772E-03 | 3,004E-01 | 2,498E-01 |
| 497 | 1,128E-03 | 3,132E-01 | 2,354E-01 |
| 498 | 7,519E-04 | 3,259E-01 | 2,223E-01 |
| 499 | 3,759E-04 | 3,386E-01 | 2,093E-01 |
| 500 | 9,325E-11 | 3,514E-01 | 1,963E-01 |
| 501 | 5,632E-04 | 3,673E-01 | 1,832E-01 |
| 502 | 1,126E-03 | 3,833E-01 | 1,702E-01 |
| 503 | 2,108E-03 | 3,992E-01 | 1,594E-01 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 504 | 3,090E-03 | 4,152E-01 | 1,487E-01 |
| 505 | 4,071E-03 | 4,311E-01 | 1,379E-01 |
| 506 | 6,803E-03 | 4,498E-01 | 1,271E-01 |
| 507 | 9,534E-03 | 4,684E-01 | 1,164E-01 |
| 508 | 1,298E-02 | 4,870E-01 | 1,095E-01 |
| 509 | 1,643E-02 | 5,056E-01 | 1,026E-01 |
| 510 | 1,988E-02 | 5,242E-01 | 9,565E-02 |
| 511 | 2,572E-02 | 5,443E-01 | 8,875E-02 |
| 512 | 3,157E-02 | 5,643E-01 | 8,184E-02 |
| 513 | 3,773E-02 | 5,844E-01 | 7,663E-02 |
| 514 | 4,390E-02 | 6,045E-01 | 7,142E-02 |
| 515 | 5,006E-02 | 6,245E-01 | 6,621E-02 |
| 516 | 5,765E-02 | 6,441E-01 | 6,101E-02 |
| 517 | 6,524E-02 | 6,636E-01 | 5,580E-02 |
| 518 | 7,311E-02 | 6,831E-01 | 5,204E-02 |
| 519 | 8,097E-02 | 7,026E-01 | 4,829E-02 |
| 520 | 8,883E-02 | 7,222E-01 | 4,453E-02 |
| 521 | 9,846E-02 | 7,375E-01 | 4,078E-02 |
| 522 | 1,081E-01 | 7,528E-01 | 3,703E-02 |
| 523 | 1,179E-01 | 7,681E-01 | 3,443E-02 |
| 524 | 1,278E-01 | 7,834E-01 | 3,184E-02 |
| 525 | 1,376E-01 | 7,987E-01 | 2,924E-02 |
| 526 | 1,488E-01 | 8,112E-01 | 2,664E-02 |
| 527 | 1,599E-01 | 8,238E-01 | 2,405E-02 |
| 528 | 1,711E-01 | 8,363E-01 | 2,233E-02 |
| 529 | 1,824E-01 | 8,489E-01 | 2,060E-02 |
| 530 | 1,937E-01 | 8,614E-01 | 1,888E-02 |
| 531 | 2,055E-01 | 8,713E-01 | 1,716E-02 |
| 532 | 2,173E-01 | 8,812E-01 | 1,544E-02 |
| 533 | 2,292E-01 | 8,910E-01 | 1,429E-02 |
| 534 | 2,411E-01 | 9,009E-01 | 1,314E-02 |
| 535 | 2,530E-01 | 9,108E-01 | 1,200E-02 |
| 536 | 2,669E-01 | 9,202E-01 | 1,085E-02 |
| 537 | 2,807E-01 | 9,296E-01 | 9,701E-03 |
| 538 | 2,947E-01 | 9,389E-01 | 8,969E-03 |
| 539 | 3,086E-01 | 9,483E-01 | 8,236E-03 |
| 540 | 3,226E-01 | 9,577E-01 | 7,503E-03 |
| 541 | 3,366E-01 | 9,630E-01 | 6,770E-03 |
| 542 | 3,506E-01 | 9,683E-01 | 6,038E-03 |
| 543 | 3,647E-01 | 9,736E-01 | 5,576E-03 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 544 | 3,788E-01 | 9,789E-01 | 5,115E-03 |
| 545 | 3,929E-01 | 9,842E-01 | 4,653E-03 |
| 546 | 4,066E-01 | 9,856E-01 | 4,192E-03 |
| 547 | 4,202E-01 | 9,870E-01 | 3,730E-03 |
| 548 | 4,339E-01 | 9,884E-01 | 3,442E-03 |
| 549 | 4,476E-01 | 9,898E-01 | 3,154E-03 |
| 550 | 4,612E-01 | 9,912E-01 | 2,865E-03 |
| 551 | 4,768E-01 | 9,932E-01 | 2,577E-03 |
| 552 | 4,923E-01 | 9,952E-01 | 2,289E-03 |
| 553 | 5,079E-01 | 9,972E-01 | 2,113E-03 |
| 554 | 5,234E-01 | 9,991E-01 | 1,936E-03 |
| 555 | 5,390E-01 | 1,001E+00 | 1,760E-03 |
| 556 | 5,558E-01 | 1,000E+00 | 1,584E-03 |
| 557 | 5,726E-01 | 9,998E-01 | 1,408E-03 |
| 558 | 5,894E-01 | 9,992E-01 | 1,300E-03 |
| 559 | 6,063E-01 | 9,986E-01 | 1,191E-03 |
| 560 | 6,231E-01 | 9,979E-01 | 1,083E-03 |
| 561 | 6,405E-01 | 9,965E-01 | 9,750E-04 |
| 562 | 6,578E-01 | 9,951E-01 | 8,668E-04 |
| 563 | 6,752E-01 | 9,937E-01 | 8,005E-04 |
| 564 | 6,926E-01 | 9,923E-01 | 7,342E-04 |
| 565 | 7,099E-01 | 9,908E-01 | 6,679E-04 |
| 566 | 7,286E-01 | 9,873E-01 | 6,016E-04 |
| 567 | 7,472E-01 | 9,838E-01 | 5,354E-04 |
| 568 | 7,659E-01 | 9,803E-01 | 4,948E-04 |
| 569 | 7,845E-01 | 9,768E-01 | 4,542E-04 |
| 570 | 8,032E-01 | 9,733E-01 | 4,136E-04 |
| 571 | 8,205E-01 | 9,670E-01 | 3,729E-04 |
| 572 | 8,378E-01 | 9,608E-01 | 3,323E-04 |
| 573 | 8,551E-01 | 9,545E-01 | 3,074E-04 |
| 574 | 8,724E-01 | 9,482E-01 | 2,825E-04 |
| 575 | 8,897E-01 | 9,419E-01 | 2,576E-04 |
| 576 | 9,050E-01 | 9,326E-01 | 2,326E-04 |
| 577 | 9,202E-01 | 9,233E-01 | 2,077E-04 |
| 578 | 9,355E-01 | 9,140E-01 | 1,923E-04 |
| 579 | 9,507E-01 | 9,047E-01 | 1,770E-04 |
| 580 | 9,660E-01 | 8,954E-01 | 1,616E-04 |
| 581 | 9,829E-01 | 8,878E-01 | 1,462E-04 |
| 582 | 9,999E-01 | 8,802E-01 | 1,309E-04 |
| 583 | 1,017E+00 | 8,726E-01 | 1,213E-04 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 584 | 1,034E+00 | 8,650E-01 | 1,118E-04 |
| 585 | 1,051E+00 | 8,574E-01 | 1,023E-04 |
| 586 | 1,062E+00 | 8,479E-01 | 9,276E-05 |
| 587 | 1,074E+00 | 8,384E-01 | 8,323E-05 |
| 588 | 1,085E+00 | 8,289E-01 | 7,728E-05 |
| 589 | 1,096E+00 | 8,194E-01 | 7,133E-05 |
| 590 | 1,108E+00 | 8,099E-01 | 6,538E-05 |
| 591 | 1,114E+00 | 7,985E-01 | 5,943E-05 |
| 592 | 1,120E+00 | 7,870E-01 | 5,348E-05 |
| 593 | 1,127E+00 | 7,755E-01 | 4,973E-05 |
| 594 | 1,133E+00 | 7,641E-01 | 4,599E-05 |
| 595 | 1,139E+00 | 7,526E-01 | 4,224E-05 |
| 596 | 1,141E+00 | 7,401E-01 | 3,850E-05 |
| 597 | 1,142E+00 | 7,275E-01 | 3,475E-05 |
| 598 | 1,143E+00 | 7,150E-01 | 3,237E-05 |
| 599 | 1,144E+00 | 7,025E-01 | 2,999E-05 |
| 600 | 1,145E+00 | 6,899E-01 | 2,761E-05 |
| 601 | 1,142E+00 | 6,770E-01 | 2,523E-05 |
| 602 | 1,138E+00 | 6,640E-01 | 2,285E-05 |
| 603 | 1,135E+00 | 6,510E-01 | 2,132E-05 |
| 604 | 1,131E+00 | 6,380E-01 | 1,979E-05 |
| 605 | 1,128E+00 | 6,250E-01 | 1,827E-05 |
| 606 | 1,118E+00 | 6,113E-01 | 1,674E-05 |
| 607 | 1,107E+00 | 5,976E-01 | 1,521E-05 |
| 608 | 1,097E+00 | 5,839E-01 | 1,422E-05 |
| 609 | 1,087E+00 | 5,702E-01 | 1,323E-05 |
| 610 | 1,077E+00 | 5,565E-01 | 1,224E-05 |
| 611 | 1,061E+00 | 5,427E-01 | 1,125E-05 |
| 612 | 1,046E+00 | 5,290E-01 | 1,025E-05 |
| 613 | 1,030E+00 | 5,153E-01 | 8,203E-06 |
| 614 | 1,015E+00 | 5,015E-01 | 6,152E-06 |
| 615 | 9,997E-01 | 4,878E-01 | 4,102E-06 |
| 616 | 9,812E-01 | 4,745E-01 | 2,051E-06 |
| 617 | 9,626E-01 | 4,612E-01 | 0,000E+00 |
| 618 | 9,440E-01 | 4,479E-01 | 0,000E+00 |
| 619 | 9,255E-01 | 4,347E-01 | 0,000E+00 |
| 620 | 9,069E-01 | 4,214E-01 | 0,000E+00 |
| 621 | 8,868E-01 | 4,090E-01 | 0,000E+00 |
| 622 | 8,668E-01 | 3,966E-01 | 0,000E+00 |
| 623 | 8,467E-01 | 3,842E-01 | 0,000E+00 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 624 | 8,266E-01 | 3,719E-01 | 0,000E+00 |
| 625 | 8,066E-01 | 3,595E-01 | 0,000E+00 |
| 626 | 7,825E-01 | 3,469E-01 | 0,000E+00 |
| 627 | 7,584E-01 | 3,344E-01 | 0,000E+00 |
| 628 | 7,344E-01 | 3,219E-01 | 0,000E+00 |
| 629 | 7,103E-01 | 3,093E-01 | 0,000E+00 |
| 630 | 6,862E-01 | 2,968E-01 | 0,000E+00 |
| 631 | 6,630E-01 | 2,856E-01 | 0,000E+00 |
| 632 | 6,398E-01 | 2,743E-01 | 0,000E+00 |
| 633 | 6,165E-01 | 2,631E-01 | 0,000E+00 |
| 634 | 5,933E-01 | 2,518E-01 | 0,000E+00 |
| 635 | 5,701E-01 | 2,406E-01 | 0,000E+00 |
| 636 | 5,497E-01 | 2,311E-01 | 0,000E+00 |
| 637 | 5,294E-01 | 2,217E-01 | 0,000E+00 |
| 638 | 5,091E-01 | 2,123E-01 | 0,000E+00 |
| 639 | 4,888E-01 | 2,028E-01 | 0,000E+00 |
| 640 | 4,684E-01 | 1,934E-01 | 0,000E+00 |
| 641 | 4,509E-01 | 1,855E-01 | 0,000E+00 |
| 642 | 4,333E-01 | 1,776E-01 | 0,000E+00 |
| 643 | 4,157E-01 | 1,697E-01 | 0,000E+00 |
| 644 | 3,982E-01 | 1,619E-01 | 0,000E+00 |
| 645 | 3,806E-01 | 1,540E-01 | 0,000E+00 |
| 646 | 3,638E-01 | 1,469E-01 | 0,000E+00 |
| 647 | 3,470E-01 | 1,399E-01 | 0,000E+00 |
| 648 | 3,302E-01 | 1,328E-01 | 0,000E+00 |
| 649 | 3,134E-01 | 1,258E-01 | 0,000E+00 |
| 650 | 2,966E-01 | 1,187E-01 | 0,000E+00 |
| 651 | 2,824E-01 | 1,128E-01 | 0,000E+00 |
| 652 | 2,681E-01 | 1,070E-01 | 0,000E+00 |
| 653 | 2,539E-01 | 1,011E-01 | 0,000E+00 |
| 654 | 2,396E-01 | 9,521E-02 | 0,000E+00 |
| 655 | 2,254E-01 | 8,933E-02 | 0,000E+00 |
| 656 | 2,141E-01 | 8,474E-02 | 0,000E+00 |
| 657 | 2,028E-01 | 8,014E-02 | 0,000E+00 |
| 658 | 1,915E-01 | 7,555E-02 | 0,000E+00 |
| 659 | 1,802E-01 | 7,095E-02 | 0,000E+00 |
| 660 | 1,690E-01 | 6,636E-02 | 0,000E+00 |
| 661 | 1,602E-01 | 6,283E-02 | 0,000E+00 |
| 662 | 1,514E-01 | 5,931E-02 | 0,000E+00 |
| 663 | 1,426E-01 | 5,579E-02 | 0,000E+00 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 664 | 1,338E-01 | 5,226E-02 | 0,000E+00 |
| 665 | 1,250E-01 | 4,874E-02 | 0,000E+00 |
| 666 | 1,183E-01 | 4,607E-02 | 0,000E+00 |
| 667 | 1,115E-01 | 4,341E-02 | 0,000E+00 |
| 668 | 1,048E-01 | 4,074E-02 | 0,000E+00 |
| 669 | 9,801E-02 | 3,808E-02 | 0,000E+00 |
| 670 | 9,125E-02 | 3,541E-02 | 0,000E+00 |
| 671 | 8,614E-02 | 3,341E-02 | 0,000E+00 |
| 672 | 8,103E-02 | 3,141E-02 | 0,000E+00 |
| 673 | 7,591E-02 | 2,941E-02 | 0,000E+00 |
| 674 | 7,080E-02 | 2,741E-02 | 0,000E+00 |
| 675 | 6,569E-02 | 2,541E-02 | 0,000E+00 |
| 676 | 6,187E-02 | 2,392E-02 | 0,000E+00 |
| 677 | 5,805E-02 | 2,244E-02 | 0,000E+00 |
| 678 | 5,423E-02 | 2,095E-02 | 0,000E+00 |
| 679 | 5,042E-02 | 1,947E-02 | 0,000E+00 |
| 680 | 4,660E-02 | 1,798E-02 | 0,000E+00 |
| 681 | 4,379E-02 | 1,690E-02 | 0,000E+00 |
| 682 | 4,099E-02 | 1,581E-02 | 0,000E+00 |
| 683 | 3,818E-02 | 1,472E-02 | 0,000E+00 |
| 684 | 3,537E-02 | 1,364E-02 | 0,000E+00 |
| 685 | 3,257E-02 | 1,255E-02 | 0,000E+00 |
| 686 | 3,053E-02 | 1,176E-02 | 0,000E+00 |
| 687 | 2,849E-02 | 1,098E-02 | 0,000E+00 |
| 688 | 2,645E-02 | 1,019E-02 | 0,000E+00 |
| 689 | 2,442E-02 | 9,403E-03 | 0,000E+00 |
| 690 | 2,238E-02 | 8,616E-03 | 0,000E+00 |
| 691 | 2,102E-02 | 8,092E-03 | 0,000E+00 |
| 692 | 1,966E-02 | 7,568E-03 | 0,000E+00 |
| 693 | 1,830E-02 | 7,044E-03 | 0,000E+00 |
| 694 | 1,694E-02 | 6,520E-03 | 0,000E+00 |
| 695 | 1,558E-02 | 5,996E-03 | 0,000E+00 |
| 696 | 1,464E-02 | 5,632E-03 | 0,000E+00 |
| 697 | 1,369E-02 | 5,267E-03 | 0,000E+00 |
| 698 | 1,274E-02 | 4,903E-03 | 0,000E+00 |
| 699 | 1,180E-02 | 4,538E-03 | 0,000E+00 |
| 700 | 1,085E-02 | 4,174E-03 | 0,000E+00 |
| 701 | 1,018E-02 | 3,918E-03 | 0,000E+00 |
| 702 | 9,520E-03 | 3,663E-03 | 0,000E+00 |
| 703 | 8,856E-03 | 3,407E-03 | 0,000E+00 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 704 | 8,191E-03 | 3,151E-03 | 0,000E+00 |
| 705 | 7,527E-03 | 2,896E-03 | 0,000E+00 |
| 706 | 7,053E-03 | 2,714E-03 | 0,000E+00 |
| 707 | 6,579E-03 | 2,531E-03 | 0,000E+00 |
| 708 | 6,106E-03 | 2,349E-03 | 0,000E+00 |
| 709 | 5,632E-03 | 2,167E-03 | 0,000E+00 |
| 710 | 5,158E-03 | 1,985E-03 | 0,000E+00 |
| 711 | 4,833E-03 | 1,860E-03 | 0,000E+00 |
| 712 | 4,507E-03 | 1,735E-03 | 0,000E+00 |
| 713 | 4,182E-03 | 1,610E-03 | 0,000E+00 |
| 714 | 3,856E-03 | 1,485E-03 | 0,000E+00 |
| 715 | 3,531E-03 | 1,360E-03 | 0,000E+00 |
| 716 | 3,312E-03 | 1,276E-03 | 0,000E+00 |
| 717 | 3,094E-03 | 1,192E-03 | 0,000E+00 |
| 718 | 2,875E-03 | 1,108E-03 | 0,000E+00 |
| 719 | 2,657E-03 | 1,024E-03 | 0,000E+00 |
| 720 | 2,438E-03 | 9,398E-04 | 0,000E+00 |
| 721 | 2,288E-03 | 8,819E-04 | 0,000E+00 |
| 722 | 2,137E-03 | 8,240E-04 | 0,000E+00 |
| 723 | 1,987E-03 | 7,661E-04 | 0,000E+00 |
| 724 | 1,836E-03 | 7,082E-04 | 0,000E+00 |
| 725 | 1,686E-03 | 6,503E-04 | 0,000E+00 |
| 726 | 1,583E-03 | 6,109E-04 | 0,000E+00 |
| 727 | 1,481E-03 | 5,715E-04 | 0,000E+00 |
| 728 | 1,378E-03 | 5,320E-04 | 0,000E+00 |
| 729 | 1,276E-03 | 4,926E-04 | 0,000E+00 |
| 730 | 1,173E-03 | 4,532E-04 | 0,000E+00 |
| 731 | 1,102E-03 | 4,258E-04 | 0,000E+00 |
| 732 | 1,031E-03 | 3,985E-04 | 0,000E+00 |
| 733 | 9,602E-04 | 3,711E-04 | 0,000E+00 |
| 734 | 8,891E-04 | 3,437E-04 | 0,000E+00 |
| 735 | 8,181E-04 | 3,163E-04 | 0,000E+00 |
| 736 | 7,684E-04 | 2,972E-04 | 0,000E+00 |
| 737 | 7,187E-04 | 2,780E-04 | 0,000E+00 |
| 738 | 6,690E-04 | 2,589E-04 | 0,000E+00 |
| 739 | 6,193E-04 | 2,397E-04 | 0,000E+00 |
| 740 | 5,696E-04 | 2,206E-04 | 0,000E+00 |
| 741 | 5,360E-04 | 2,076E-04 | 0,000E+00 |
| 742 | 5,024E-04 | 1,946E-04 | 0,000E+00 |
| 743 | 4,687E-04 | 1,817E-04 | 0,000E+00 |

Tabelle A.21 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-2^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-2^\circ}$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 744 | 4,351E-04 | 1,687E-04 | 0,000E+00 |
| 745 | 4,015E-04 | 1,557E-04 | 0,000E+00 |
| 746 | 3,777E-04 | 1,466E-04 | 0,000E+00 |
| 747 | 3,539E-04 | 1,374E-04 | 0,000E+00 |
| 748 | 3,301E-04 | 1,282E-04 | 0,000E+00 |
| 749 | 3,064E-04 | 1,190E-04 | 0,000E+00 |
| 750 | 2,826E-04 | 1,098E-04 | 0,000E+00 |
| 751 | 2,661E-04 | 1,034E-04 | 0,000E+00 |
| 752 | 2,496E-04 | 9,703E-05 | 0,000E+00 |
| 753 | 2,330E-04 | 9,064E-05 | 0,000E+00 |
| 754 | 2,165E-04 | 8,425E-05 | 0,000E+00 |
| 755 | 2,000E-04 | 7,786E-05 | 0,000E+00 |
| 756 | 1,885E-04 | 7,339E-05 | 0,000E+00 |
| 757 | 1,769E-04 | 6,892E-05 | 0,000E+00 |
| 758 | 1,654E-04 | 6,444E-05 | 0,000E+00 |
| 759 | 1,538E-04 | 5,997E-05 | 0,000E+00 |
| 760 | 1,423E-04 | 5,550E-05 | 0,000E+00 |
| 761 | 1,341E-04 | 5,232E-05 | 0,000E+00 |
| 762 | 1,259E-04 | 4,914E-05 | 0,000E+00 |
| 763 | 1,177E-04 | 4,596E-05 | 0,000E+00 |
| 764 | 1,096E-04 | 4,279E-05 | 0,000E+00 |
| 765 | 1,014E-04 | 3,961E-05 | 0,000E+00 |
| 766 | 9,564E-05 | 3,738E-05 | 0,000E+00 |
| 767 | 8,990E-05 | 3,515E-05 | 0,000E+00 |
| 768 | 8,416E-05 | 3,292E-05 | 0,000E+00 |
| 769 | 7,843E-05 | 3,068E-05 | 0,000E+00 |
| 770 | 7,269E-05 | 2,845E-05 | 0,000E+00 |
| 771 | 6,856E-05 | 2,684E-05 | 0,000E+00 |
| 772 | 6,443E-05 | 2,523E-05 | 0,000E+00 |
| 773 | 6,030E-05 | 2,362E-05 | 0,000E+00 |
| 774 | 5,617E-05 | 2,201E-05 | 0,000E+00 |
| 775 | 5,204E-05 | 2,041E-05 | 0,000E+00 |
| 776 | 4,916E-05 | 1,928E-05 | 0,000E+00 |
| 777 | 4,628E-05 | 1,816E-05 | 0,000E+00 |
| 778 | 4,341E-05 | 1,704E-05 | 0,000E+00 |
| 779 | 4,053E-05 | 1,592E-05 | 0,000E+00 |
| 780 | 3,765E-05 | 1,479E-05 | 0,000E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten.

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 390 | 6,288E-03 | 5,118E-04 | 2,932E-02 |
| 391 | 7,263E-03 | 6,533E-04 | 3,368E-02 |
| 392 | 8,238E-03 | 7,948E-04 | 3,803E-02 |
| 393 | 1,036E-02 | 9,362E-04 | 4,808E-02 |
| 394 | 1,248E-02 | 1,078E-03 | 5,814E-02 |
| 395 | 1,460E-02 | 1,219E-03 | 6,819E-02 |
| 396 | 1,682E-02 | 1,523E-03 | 7,824E-02 |
| 397 | 1,903E-02 | 1,826E-03 | 8,829E-02 |
| 398 | 2,366E-02 | 2,130E-03 | 1,104E-01 |
| 399 | 2,830E-02 | 2,433E-03 | 1,324E-01 |
| 400 | 3,293E-02 | 2,737E-03 | 1,545E-01 |
| 401 | 3,772E-02 | 3,338E-03 | 1,766E-01 |
| 402 | 4,251E-02 | 3,940E-03 | 1,986E-01 |
| 403 | 5,069E-02 | 4,542E-03 | 2,375E-01 |
| 404 | 5,886E-02 | 5,143E-03 | 2,764E-01 |
| 405 | 6,704E-02 | 5,745E-03 | 3,152E-01 |
| 406 | 7,538E-02 | 6,770E-03 | 3,541E-01 |
| 407 | 8,373E-02 | 7,795E-03 | 3,930E-01 |
| 408 | 9,539E-02 | 8,820E-03 | 4,483E-01 |
| 409 | 1,070E-01 | 9,846E-03 | 5,036E-01 |
| 410 | 1,187E-01 | 1,087E-02 | 5,589E-01 |
| 411 | 1,302E-01 | 1,225E-02 | 6,142E-01 |
| 412 | 1,418E-01 | 1,363E-02 | 6,695E-01 |
| 413 | 1,558E-01 | 1,502E-02 | 7,374E-01 |
| 414 | 1,699E-01 | 1,640E-02 | 8,053E-01 |
| 415 | 1,839E-01 | 1,778E-02 | 8,731E-01 |
| 416 | 1,978E-01 | 1,955E-02 | 9,410E-01 |
| 417 | 2,116E-01 | 2,132E-02 | 1,009E+00 |
| 418 | 2,245E-01 | 2,309E-02 | 1,072E+00 |
| 419 | 2,374E-01 | 2,487E-02 | 1,135E+00 |
| 420 | 2,503E-01 | 2,664E-02 | 1,198E+00 |
| 421 | 2,626E-01 | 2,859E-02 | 1,262E+00 |
| 422 | 2,749E-01 | 3,053E-02 | 1,325E+00 |
| 423 | 2,873E-01 | 3,248E-02 | 1,388E+00 |
| 424 | 2,996E-01 | 3,443E-02 | 1,452E+00 |
| 425 | 3,120E-01 | 3,638E-02 | 1,515E+00 |
| 426 | 3,240E-01 | 3,877E-02 | 1,579E+00 |
| 427 | 3,359E-01 | 4,116E-02 | 1,642E+00 |
| 428 | 3,447E-01 | 4,355E-02 | 1,690E+00 |
| 429 | 3,536E-01 | 4,594E-02 | 1,738E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 430 | 3,624E-01 | 4,833E-02 | 1,785E+00 |
| 431 | 3,705E-01 | 5,106E-02 | 1,833E+00 |
| 432 | 3,786E-01 | 5,380E-02 | 1,881E+00 |
| 433 | 3,854E-01 | 5,653E-02 | 1,922E+00 |
| 434 | 3,921E-01 | 5,927E-02 | 1,963E+00 |
| 435 | 3,989E-01 | 6,200E-02 | 2,004E+00 |
| 436 | 4,055E-01 | 6,488E-02 | 2,045E+00 |
| 437 | 4,120E-01 | 6,775E-02 | 2,086E+00 |
| 438 | 4,125E-01 | 7,063E-02 | 2,096E+00 |
| 439 | 4,129E-01 | 7,350E-02 | 2,106E+00 |
| 440 | 4,133E-01 | 7,638E-02 | 2,117E+00 |
| 441 | 4,135E-01 | 7,910E-02 | 2,127E+00 |
| 442 | 4,137E-01 | 8,182E-02 | 2,137E+00 |
| 443 | 4,114E-01 | 8,454E-02 | 2,135E+00 |
| 444 | 4,091E-01 | 8,725E-02 | 2,134E+00 |
| 445 | 4,068E-01 | 8,997E-02 | 2,132E+00 |
| 446 | 4,045E-01 | 9,313E-02 | 2,130E+00 |
| 447 | 4,022E-01 | 9,628E-02 | 2,128E+00 |
| 448 | 3,928E-01 | 9,944E-02 | 2,091E+00 |
| 449 | 3,833E-01 | 1,026E-01 | 2,054E+00 |
| 450 | 3,739E-01 | 1,057E-01 | 2,018E+00 |
| 451 | 3,649E-01 | 1,089E-01 | 1,981E+00 |
| 452 | 3,558E-01 | 1,120E-01 | 1,944E+00 |
| 453 | 3,469E-01 | 1,152E-01 | 1,908E+00 |
| 454 | 3,380E-01 | 1,183E-01 | 1,872E+00 |
| 455 | 3,290E-01 | 1,215E-01 | 1,836E+00 |
| 456 | 3,196E-01 | 1,259E-01 | 1,800E+00 |
| 457 | 3,102E-01 | 1,303E-01 | 1,764E+00 |
| 458 | 3,005E-01 | 1,347E-01 | 1,726E+00 |
| 459 | 2,908E-01 | 1,391E-01 | 1,688E+00 |
| 460 | 2,811E-01 | 1,436E-01 | 1,651E+00 |
| 461 | 2,715E-01 | 1,493E-01 | 1,613E+00 |
| 462 | 2,620E-01 | 1,551E-01 | 1,576E+00 |
| 463 | 2,490E-01 | 1,609E-01 | 1,522E+00 |
| 464 | 2,361E-01 | 1,667E-01 | 1,467E+00 |
| 465 | 2,232E-01 | 1,724E-01 | 1,413E+00 |
| 466 | 2,108E-01 | 1,784E-01 | 1,359E+00 |
| 467 | 1,985E-01 | 1,845E-01 | 1,304E+00 |
| 468 | 1,851E-01 | 1,905E-01 | 1,244E+00 |
| 469 | 1,716E-01 | 1,965E-01 | 1,185E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 470 | 1,582E-01 | 2,025E-01 | 1,125E+00 |
| 471 | 1,457E-01 | 2,088E-01 | 1,065E+00 |
| 472 | 1,331E-01 | 2,151E-01 | 1,005E+00 |
| 473 | 1,222E-01 | 2,214E-01 | 9,533E-01 |
| 474 | 1,114E-01 | 2,276E-01 | 9,016E-01 |
| 475 | 1,005E-01 | 2,339E-01 | 8,499E-01 |
| 476 | 9,012E-02 | 2,414E-01 | 7,982E-01 |
| 477 | 7,977E-02 | 2,488E-01 | 7,465E-01 |
| 478 | 7,194E-02 | 2,562E-01 | 7,074E-01 |
| 479 | 6,411E-02 | 2,637E-01 | 6,682E-01 |
| 480 | 5,628E-02 | 2,711E-01 | 6,291E-01 |
| 481 | 4,892E-02 | 2,797E-01 | 5,899E-01 |
| 482 | 4,156E-02 | 2,883E-01 | 5,508E-01 |
| 483 | 3,580E-02 | 2,969E-01 | 5,195E-01 |
| 484 | 3,003E-02 | 3,054E-01 | 4,883E-01 |
| 485 | 2,426E-02 | 3,140E-01 | 4,570E-01 |
| 486 | 1,954E-02 | 3,230E-01 | 4,258E-01 |
| 487 | 1,482E-02 | 3,319E-01 | 3,945E-01 |
| 488 | 1,210E-02 | 3,408E-01 | 3,732E-01 |
| 489 | 9,387E-03 | 3,497E-01 | 3,519E-01 |
| 490 | 6,669E-03 | 3,587E-01 | 3,306E-01 |
| 491 | 4,746E-03 | 3,706E-01 | 3,093E-01 |
| 492 | 2,823E-03 | 3,825E-01 | 2,880E-01 |
| 493 | 1,882E-03 | 3,945E-01 | 2,716E-01 |
| 494 | 9,411E-04 | 4,064E-01 | 2,551E-01 |
| 495 | 2,484E-09 | 4,184E-01 | 2,387E-01 |
| 496 | 6,319E-04 | 4,311E-01 | 2,223E-01 |
| 497 | 1,264E-03 | 4,438E-01 | 2,058E-01 |
| 498 | 2,473E-03 | 4,564E-01 | 1,923E-01 |
| 499 | 3,683E-03 | 4,691E-01 | 1,787E-01 |
| 500 | 4,892E-03 | 4,818E-01 | 1,652E-01 |
| 501 | 7,086E-03 | 4,961E-01 | 1,516E-01 |
| 502 | 9,280E-03 | 5,103E-01 | 1,380E-01 |
| 503 | 1,217E-02 | 5,246E-01 | 1,279E-01 |
| 504 | 1,506E-02 | 5,389E-01 | 1,179E-01 |
| 505 | 1,795E-02 | 5,531E-01 | 1,078E-01 |
| 506 | 2,257E-02 | 5,683E-01 | 9,765E-02 |
| 507 | 2,720E-02 | 5,834E-01 | 8,755E-02 |
| 508 | 3,264E-02 | 5,986E-01 | 8,156E-02 |
| 509 | 3,809E-02 | 6,137E-01 | 7,556E-02 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 510 | 4,354E-02 | 6,289E-01 | 6,956E-02 |
| 511 | 5,122E-02 | 6,441E-01 | 6,356E-02 |
| 512 | 5,889E-02 | 6,594E-01 | 5,756E-02 |
| 513 | 6,697E-02 | 6,747E-01 | 5,353E-02 |
| 514 | 7,504E-02 | 6,899E-01 | 4,949E-02 |
| 515 | 8,311E-02 | 7,052E-01 | 4,545E-02 |
| 516 | 9,220E-02 | 7,207E-01 | 4,142E-02 |
| 517 | 1,013E-01 | 7,362E-01 | 3,738E-02 |
| 518 | 1,107E-01 | 7,517E-01 | 3,471E-02 |
| 519 | 1,200E-01 | 7,672E-01 | 3,203E-02 |
| 520 | 1,294E-01 | 7,828E-01 | 2,935E-02 |
| 521 | 1,405E-01 | 7,945E-01 | 2,668E-02 |
| 522 | 1,517E-01 | 8,062E-01 | 2,400E-02 |
| 523 | 1,630E-01 | 8,179E-01 | 2,224E-02 |
| 524 | 1,743E-01 | 8,297E-01 | 2,048E-02 |
| 525 | 1,857E-01 | 8,414E-01 | 1,871E-02 |
| 526 | 1,981E-01 | 8,504E-01 | 1,695E-02 |
| 527 | 2,106E-01 | 8,594E-01 | 1,519E-02 |
| 528 | 2,231E-01 | 8,684E-01 | 1,407E-02 |
| 529 | 2,357E-01 | 8,774E-01 | 1,296E-02 |
| 530 | 2,483E-01 | 8,864E-01 | 1,185E-02 |
| 531 | 2,616E-01 | 8,944E-01 | 1,073E-02 |
| 532 | 2,748E-01 | 9,025E-01 | 9,617E-03 |
| 533 | 2,882E-01 | 9,105E-01 | 8,893E-03 |
| 534 | 3,015E-01 | 9,185E-01 | 8,168E-03 |
| 535 | 3,149E-01 | 9,266E-01 | 7,444E-03 |
| 536 | 3,307E-01 | 9,351E-01 | 6,719E-03 |
| 537 | 3,465E-01 | 9,437E-01 | 5,995E-03 |
| 538 | 3,623E-01 | 9,522E-01 | 5,538E-03 |
| 539 | 3,782E-01 | 9,608E-01 | 5,082E-03 |
| 540 | 3,940E-01 | 9,693E-01 | 4,625E-03 |
| 541 | 4,096E-01 | 9,736E-01 | 4,169E-03 |
| 542 | 4,253E-01 | 9,780E-01 | 3,712E-03 |
| 543 | 4,410E-01 | 9,823E-01 | 3,427E-03 |
| 544 | 4,566E-01 | 9,866E-01 | 3,142E-03 |
| 545 | 4,723E-01 | 9,910E-01 | 2,857E-03 |
| 546 | 4,869E-01 | 9,913E-01 | 2,572E-03 |
| 547 | 5,014E-01 | 9,916E-01 | 2,287E-03 |
| 548 | 5,160E-01 | 9,919E-01 | 2,110E-03 |
| 549 | 5,306E-01 | 9,922E-01 | 1,934E-03 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 550 | 5,452E-01 | 9,925E-01 | 1,757E-03 |
| 551 | 5,621E-01 | 9,942E-01 | 1,580E-03 |
| 552 | 5,789E-01 | 9,959E-01 | 1,403E-03 |
| 553 | 5,958E-01 | 9,976E-01 | 1,295E-03 |
| 554 | 6,127E-01 | 9,993E-01 | 1,187E-03 |
| 555 | 6,295E-01 | 1,001E+00 | 1,079E-03 |
| 556 | 6,471E-01 | 9,998E-01 | 9,713E-04 |
| 557 | 6,646E-01 | 9,987E-01 | 8,632E-04 |
| 558 | 6,821E-01 | 9,975E-01 | 7,969E-04 |
| 559 | 6,996E-01 | 9,963E-01 | 7,305E-04 |
| 560 | 7,171E-01 | 9,952E-01 | 6,642E-04 |
| 561 | 7,346E-01 | 9,932E-01 | 5,978E-04 |
| 562 | 7,521E-01 | 9,911E-01 | 5,315E-04 |
| 563 | 7,695E-01 | 9,891E-01 | 4,908E-04 |
| 564 | 7,870E-01 | 9,871E-01 | 4,502E-04 |
| 565 | 8,045E-01 | 9,850E-01 | 4,095E-04 |
| 566 | 8,224E-01 | 9,808E-01 | 3,689E-04 |
| 567 | 8,403E-01 | 9,765E-01 | 3,283E-04 |
| 568 | 8,582E-01 | 9,723E-01 | 3,034E-04 |
| 569 | 8,761E-01 | 9,680E-01 | 2,785E-04 |
| 570 | 8,940E-01 | 9,638E-01 | 2,536E-04 |
| 571 | 9,092E-01 | 9,566E-01 | 2,287E-04 |
| 572 | 9,245E-01 | 9,494E-01 | 2,038E-04 |
| 573 | 9,398E-01 | 9,422E-01 | 1,885E-04 |
| 574 | 9,551E-01 | 9,351E-01 | 1,732E-04 |
| 575 | 9,704E-01 | 9,279E-01 | 1,579E-04 |
| 576 | 9,824E-01 | 9,176E-01 | 1,426E-04 |
| 577 | 9,944E-01 | 9,073E-01 | 1,274E-04 |
| 578 | 1,006E+00 | 8,970E-01 | 1,179E-04 |
| 579 | 1,018E+00 | 8,867E-01 | 1,085E-04 |
| 580 | 1,030E+00 | 8,764E-01 | 9,908E-05 |
| 581 | 1,044E+00 | 8,682E-01 | 8,966E-05 |
| 582 | 1,058E+00 | 8,601E-01 | 8,024E-05 |
| 583 | 1,072E+00 | 8,519E-01 | 7,440E-05 |
| 584 | 1,086E+00 | 8,438E-01 | 6,856E-05 |
| 585 | 1,100E+00 | 8,356E-01 | 6,271E-05 |
| 586 | 1,108E+00 | 8,256E-01 | 5,687E-05 |
| 587 | 1,116E+00 | 8,155E-01 | 5,103E-05 |
| 588 | 1,124E+00 | 8,054E-01 | 4,738E-05 |
| 589 | 1,131E+00 | 7,954E-01 | 4,373E-05 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 590 | 1,139E+00 | 7,853E-01 | 4,009E-05 |
| 591 | 1,141E+00 | 7,733E-01 | 3,644E-05 |
| 592 | 1,144E+00 | 7,613E-01 | 3,279E-05 |
| 593 | 1,146E+00 | 7,493E-01 | 3,049E-05 |
| 594 | 1,148E+00 | 7,373E-01 | 2,820E-05 |
| 595 | 1,150E+00 | 7,254E-01 | 2,590E-05 |
| 596 | 1,148E+00 | 7,125E-01 | 2,360E-05 |
| 597 | 1,145E+00 | 6,996E-01 | 2,131E-05 |
| 598 | 1,142E+00 | 6,868E-01 | 1,985E-05 |
| 599 | 1,140E+00 | 6,739E-01 | 1,839E-05 |
| 600 | 1,137E+00 | 6,610E-01 | 1,693E-05 |
| 601 | 1,130E+00 | 6,479E-01 | 1,547E-05 |
| 602 | 1,123E+00 | 6,347E-01 | 1,401E-05 |
| 603 | 1,116E+00 | 6,215E-01 | 1,307E-05 |
| 604 | 1,109E+00 | 6,084E-01 | 1,214E-05 |
| 605 | 1,102E+00 | 5,952E-01 | 1,120E-05 |
| 606 | 1,089E+00 | 5,814E-01 | 1,026E-05 |
| 607 | 1,076E+00 | 5,677E-01 | 9,326E-06 |
| 608 | 1,063E+00 | 5,540E-01 | 8,718E-06 |
| 609 | 1,050E+00 | 5,402E-01 | 8,110E-06 |
| 610 | 1,037E+00 | 5,265E-01 | 7,503E-06 |
| 611 | 1,019E+00 | 5,129E-01 | 6,895E-06 |
| 612 | 1,002E+00 | 4,993E-01 | 6,287E-06 |
| 613 | 9,847E-01 | 4,857E-01 | 5,030E-06 |
| 614 | 9,674E-01 | 4,721E-01 | 3,772E-06 |
| 615 | 9,501E-01 | 4,585E-01 | 2,515E-06 |
| 616 | 9,305E-01 | 4,455E-01 | 1,257E-06 |
| 617 | 9,109E-01 | 4,325E-01 | 0,000E+00 |
| 618 | 8,913E-01 | 4,196E-01 | 0,000E+00 |
| 619 | 8,717E-01 | 4,066E-01 | 0,000E+00 |
| 620 | 8,521E-01 | 3,936E-01 | 0,000E+00 |
| 621 | 8,318E-01 | 3,817E-01 | 0,000E+00 |
| 622 | 8,115E-01 | 3,697E-01 | 0,000E+00 |
| 623 | 7,911E-01 | 3,578E-01 | 0,000E+00 |
| 624 | 7,708E-01 | 3,458E-01 | 0,000E+00 |
| 625 | 7,505E-01 | 3,339E-01 | 0,000E+00 |
| 626 | 7,269E-01 | 3,219E-01 | 0,000E+00 |
| 627 | 7,034E-01 | 3,100E-01 | 0,000E+00 |
| 628 | 6,799E-01 | 2,980E-01 | 0,000E+00 |
| 629 | 6,563E-01 | 2,860E-01 | 0,000E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 630 | 6,328E-01 | 2,741E-01 | 0,000E+00 |
| 631 | 6,106E-01 | 2,634E-01 | 0,000E+00 |
| 632 | 5,884E-01 | 2,528E-01 | 0,000E+00 |
| 633 | 5,662E-01 | 2,422E-01 | 0,000E+00 |
| 634 | 5,440E-01 | 2,316E-01 | 0,000E+00 |
| 635 | 5,218E-01 | 2,210E-01 | 0,000E+00 |
| 636 | 5,026E-01 | 2,122E-01 | 0,000E+00 |
| 637 | 4,835E-01 | 2,033E-01 | 0,000E+00 |
| 638 | 4,644E-01 | 1,945E-01 | 0,000E+00 |
| 639 | 4,453E-01 | 1,857E-01 | 0,000E+00 |
| 640 | 4,261E-01 | 1,769E-01 | 0,000E+00 |
| 641 | 4,098E-01 | 1,696E-01 | 0,000E+00 |
| 642 | 3,935E-01 | 1,623E-01 | 0,000E+00 |
| 643 | 3,772E-01 | 1,550E-01 | 0,000E+00 |
| 644 | 3,609E-01 | 1,477E-01 | 0,000E+00 |
| 645 | 3,446E-01 | 1,404E-01 | 0,000E+00 |
| 646 | 3,292E-01 | 1,339E-01 | 0,000E+00 |
| 647 | 3,138E-01 | 1,274E-01 | 0,000E+00 |
| 648 | 2,983E-01 | 1,209E-01 | 0,000E+00 |
| 649 | 2,829E-01 | 1,144E-01 | 0,000E+00 |
| 650 | 2,675E-01 | 1,079E-01 | 0,000E+00 |
| 651 | 2,545E-01 | 1,025E-01 | 0,000E+00 |
| 652 | 2,416E-01 | 9,712E-02 | 0,000E+00 |
| 653 | 2,286E-01 | 9,174E-02 | 0,000E+00 |
| 654 | 2,156E-01 | 8,636E-02 | 0,000E+00 |
| 655 | 2,026E-01 | 8,098E-02 | 0,000E+00 |
| 656 | 1,924E-01 | 7,679E-02 | 0,000E+00 |
| 657 | 1,822E-01 | 7,260E-02 | 0,000E+00 |
| 658 | 1,719E-01 | 6,841E-02 | 0,000E+00 |
| 659 | 1,617E-01 | 6,422E-02 | 0,000E+00 |
| 660 | 1,515E-01 | 6,004E-02 | 0,000E+00 |
| 661 | 1,436E-01 | 5,684E-02 | 0,000E+00 |
| 662 | 1,357E-01 | 5,363E-02 | 0,000E+00 |
| 663 | 1,277E-01 | 5,043E-02 | 0,000E+00 |
| 664 | 1,198E-01 | 4,723E-02 | 0,000E+00 |
| 665 | 1,119E-01 | 4,403E-02 | 0,000E+00 |
| 666 | 1,058E-01 | 4,162E-02 | 0,000E+00 |
| 667 | 9,977E-02 | 3,920E-02 | 0,000E+00 |
| 668 | 9,370E-02 | 3,679E-02 | 0,000E+00 |
| 669 | 8,763E-02 | 3,437E-02 | 0,000E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 670 | 8,156E-02 | 3,196E-02 | 0,000E+00 |
| 671 | 7,698E-02 | 3,015E-02 | 0,000E+00 |
| 672 | 7,240E-02 | 2,834E-02 | 0,000E+00 |
| 673 | 6,782E-02 | 2,653E-02 | 0,000E+00 |
| 674 | 6,323E-02 | 2,472E-02 | 0,000E+00 |
| 675 | 5,865E-02 | 2,291E-02 | 0,000E+00 |
| 676 | 5,524E-02 | 2,157E-02 | 0,000E+00 |
| 677 | 5,182E-02 | 2,023E-02 | 0,000E+00 |
| 678 | 4,841E-02 | 1,889E-02 | 0,000E+00 |
| 679 | 4,499E-02 | 1,755E-02 | 0,000E+00 |
| 680 | 4,158E-02 | 1,621E-02 | 0,000E+00 |
| 681 | 3,907E-02 | 1,523E-02 | 0,000E+00 |
| 682 | 3,656E-02 | 1,425E-02 | 0,000E+00 |
| 683 | 3,406E-02 | 1,327E-02 | 0,000E+00 |
| 684 | 3,155E-02 | 1,228E-02 | 0,000E+00 |
| 685 | 2,904E-02 | 1,130E-02 | 0,000E+00 |
| 686 | 2,722E-02 | 1,060E-02 | 0,000E+00 |
| 687 | 2,541E-02 | 9,886E-03 | 0,000E+00 |
| 688 | 2,359E-02 | 9,177E-03 | 0,000E+00 |
| 689 | 2,177E-02 | 8,468E-03 | 0,000E+00 |
| 690 | 1,995E-02 | 7,758E-03 | 0,000E+00 |
| 691 | 1,874E-02 | 7,286E-03 | 0,000E+00 |
| 692 | 1,753E-02 | 6,814E-03 | 0,000E+00 |
| 693 | 1,631E-02 | 6,342E-03 | 0,000E+00 |
| 694 | 1,510E-02 | 5,870E-03 | 0,000E+00 |
| 695 | 1,389E-02 | 5,398E-03 | 0,000E+00 |
| 696 | 1,305E-02 | 5,070E-03 | 0,000E+00 |
| 697 | 1,220E-02 | 4,742E-03 | 0,000E+00 |
| 698 | 1,136E-02 | 4,414E-03 | 0,000E+00 |
| 699 | 1,051E-02 | 4,085E-03 | 0,000E+00 |
| 700 | 9,668E-03 | 3,757E-03 | 0,000E+00 |
| 701 | 9,076E-03 | 3,527E-03 | 0,000E+00 |
| 702 | 8,483E-03 | 3,297E-03 | 0,000E+00 |
| 703 | 7,891E-03 | 3,067E-03 | 0,000E+00 |
| 704 | 7,299E-03 | 2,837E-03 | 0,000E+00 |
| 705 | 6,706E-03 | 2,606E-03 | 0,000E+00 |
| 706 | 6,284E-03 | 2,442E-03 | 0,000E+00 |
| 707 | 5,862E-03 | 2,278E-03 | 0,000E+00 |
| 708 | 5,440E-03 | 2,114E-03 | 0,000E+00 |
| 709 | 5,018E-03 | 1,951E-03 | 0,000E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 710 | 4,596E-03 | 1,787E-03 | 0,000E+00 |
| 711 | 4,306E-03 | 1,674E-03 | 0,000E+00 |
| 712 | 4,016E-03 | 1,562E-03 | 0,000E+00 |
| 713 | 3,726E-03 | 1,449E-03 | 0,000E+00 |
| 714 | 3,436E-03 | 1,336E-03 | 0,000E+00 |
| 715 | 3,146E-03 | 1,224E-03 | 0,000E+00 |
| 716 | 2,951E-03 | 1,148E-03 | 0,000E+00 |
| 717 | 2,756E-03 | 1,073E-03 | 0,000E+00 |
| 718 | 2,562E-03 | 9,970E-04 | 0,000E+00 |
| 719 | 2,367E-03 | 9,214E-04 | 0,000E+00 |
| 720 | 2,172E-03 | 8,457E-04 | 0,000E+00 |
| 721 | 2,038E-03 | 7,936E-04 | 0,000E+00 |
| 722 | 1,904E-03 | 7,415E-04 | 0,000E+00 |
| 723 | 1,770E-03 | 6,894E-04 | 0,000E+00 |
| 724 | 1,636E-03 | 6,373E-04 | 0,000E+00 |
| 725 | 1,502E-03 | 5,852E-04 | 0,000E+00 |
| 726 | 1,410E-03 | 5,497E-04 | 0,000E+00 |
| 727 | 1,319E-03 | 5,143E-04 | 0,000E+00 |
| 728 | 1,228E-03 | 4,788E-04 | 0,000E+00 |
| 729 | 1,137E-03 | 4,433E-04 | 0,000E+00 |
| 730 | 1,046E-03 | 4,078E-04 | 0,000E+00 |
| 731 | 9,822E-04 | 3,832E-04 | 0,000E+00 |
| 732 | 9,189E-04 | 3,586E-04 | 0,000E+00 |
| 733 | 8,555E-04 | 3,339E-04 | 0,000E+00 |
| 734 | 7,922E-04 | 3,093E-04 | 0,000E+00 |
| 735 | 7,289E-04 | 2,846E-04 | 0,000E+00 |
| 736 | 6,846E-04 | 2,674E-04 | 0,000E+00 |
| 737 | 6,403E-04 | 2,502E-04 | 0,000E+00 |
| 738 | 5,961E-04 | 2,330E-04 | 0,000E+00 |
| 739 | 5,518E-04 | 2,157E-04 | 0,000E+00 |
| 740 | 5,076E-04 | 1,985E-04 | 0,000E+00 |
| 741 | 4,776E-04 | 1,868E-04 | 0,000E+00 |
| 742 | 4,476E-04 | 1,752E-04 | 0,000E+00 |
| 743 | 4,177E-04 | 1,635E-04 | 0,000E+00 |
| 744 | 3,877E-04 | 1,518E-04 | 0,000E+00 |
| 745 | 3,577E-04 | 1,401E-04 | 0,000E+00 |
| 746 | 3,365E-04 | 1,319E-04 | 0,000E+00 |
| 747 | 3,154E-04 | 1,236E-04 | 0,000E+00 |
| 748 | 2,942E-04 | 1,153E-04 | 0,000E+00 |
| 749 | 2,730E-04 | 1,071E-04 | 0,000E+00 |

Tabelle A.22 – Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° in 1nm Schritten. Fortsetzung

| Wellenlänge in nm | $x_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $y_{2006-TUIL-10^\circ}$ | $z_{2006-TUIL-10^\circ}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 750 | 2,518E-04 | 9,882E-05 | 0,000E+00 |
| 751 | 2,371E-04 | 9,307E-05 | 0,000E+00 |
| 752 | 2,224E-04 | 8,732E-05 | 0,000E+00 |
| 753 | 2,077E-04 | 8,157E-05 | 0,000E+00 |
| 754 | 1,930E-04 | 7,582E-05 | 0,000E+00 |
| 755 | 1,782E-04 | 7,007E-05 | 0,000E+00 |
| 756 | 1,680E-04 | 6,604E-05 | 0,000E+00 |
| 757 | 1,577E-04 | 6,201E-05 | 0,000E+00 |
| 758 | 1,474E-04 | 5,799E-05 | 0,000E+00 |
| 759 | 1,371E-04 | 5,396E-05 | 0,000E+00 |
| 760 | 1,268E-04 | 4,994E-05 | 0,000E+00 |
| 761 | 1,195E-04 | 4,708E-05 | 0,000E+00 |
| 762 | 1,122E-04 | 4,422E-05 | 0,000E+00 |
| 763 | 1,049E-04 | 4,136E-05 | 0,000E+00 |
| 764 | 9,764E-05 | 3,850E-05 | 0,000E+00 |
| 765 | 9,035E-05 | 3,564E-05 | 0,000E+00 |
| 766 | 8,524E-05 | 3,363E-05 | 0,000E+00 |
| 767 | 8,013E-05 | 3,163E-05 | 0,000E+00 |
| 768 | 7,501E-05 | 2,962E-05 | 0,000E+00 |
| 769 | 6,990E-05 | 2,761E-05 | 0,000E+00 |
| 770 | 6,479E-05 | 2,560E-05 | 0,000E+00 |
| 771 | 6,111E-05 | 2,415E-05 | 0,000E+00 |
| 772 | 5,743E-05 | 2,271E-05 | 0,000E+00 |
| 773 | 5,375E-05 | 2,126E-05 | 0,000E+00 |
| 774 | 5,007E-05 | 1,981E-05 | 0,000E+00 |
| 775 | 4,638E-05 | 1,836E-05 | 0,000E+00 |
| 776 | 4,382E-05 | 1,735E-05 | 0,000E+00 |
| 777 | 4,126E-05 | 1,634E-05 | 0,000E+00 |
| 778 | 3,869E-05 | 1,533E-05 | 0,000E+00 |
| 779 | 3,613E-05 | 1,432E-05 | 0,000E+00 |
| 780 | 3,357E-05 | 1,331E-05 | 0,000E+00 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Weg des Lichts durch das Auge. | 10 |
| 2.2 | Trichromatischer Farbabgleich nach Maxwell | 15 |
| 2.3 | Trichromatischer Farbabgleich mit Maximum-Saturation-Methode | 16 |
| 2.4 | Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 für einen 2°-Standardbeobachter. | 17 |
| 2.5 | Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 für einen 10°-Standardbeobachter. | 19 |
| 2.6 | Spektralwertfunktionen CIE2006 | 20 |
| 2.7 | Ermittlung der Sehzapfen-Grundfunktionen entsprechend CIE-Empfehlung 170-1:2006 | 22 |
| 2.8 | Wahrnehmungsschwellen-Ellipsen im Bereich des Planckschen Strahlers | 29 |
| 3.1 | Abgleichstand | 34 |
| 3.2 | Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus hinter den Testfeldern | 35 |
| 3.3 | Spektren der weißen LEDs der Typen T1 und T2 | 39 |
| 3.4 | Spektren der einzelnen LEDs der 8-LED-Lichtquelle. | 41 |
| 3.5 | Ansteuerung der Testlichtquelle im UCS-u'v'-Diagramm | 42 |
| 3.6 | Referenz- und Testlichtspektren der Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei 5000 K | 47 |
| 3.7 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für Testfarbe TF3 | 48 |
| 3.8 | Farbörter der Lichtfarbensätze 1 und 2 | 49 |
| 3.9 | Altersverteilung der Probandengruppe (n=20). Das durchschnittliche Alter lag bei (30 ± 6) Jahren. | 51 |
| 3.10 | Schematische Darstellung eines LED-Boards | 51 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.11 | Beobachtungswinkel in der Flugzeugkabine | 52 |
| 3.12 | Ergebnisschema der Abgleichversuche | 55 |
| 4.1 | Leuchtdichte auf der Referenzfläche: VS1 bis VS7 | 65 |
| 4.2 | Versuchsablauf der Side-by-Side Abgleichversuche | 66 |
| 4.3 | Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$. | 69 |
| 4.4 | Farbörter der Abgleichergebnisse K (links) und der Abgleich- ergebnisse G (rechts) | 70 |
| 4.5 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz(CIE1931)}$ | 71 |
| 4.6 | Referenz- und Testspektren der Versuchsszenarien VS1 und VS6 zu Beginn des Abgleichvorgangs bei 5000 K. | 72 |
| 4.7 | Referenz- und Testspektren von Versuchsszenario VS4 und VS7 zu Beginn des Abgleichvorgangs bei 5000 K. | 73 |
| 4.8 | Abgleichergebnisse K, M und G: Versuchsszenario VS4 | 73 |
| 4.9 | Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1931)}$. | 74 |
| 4.10 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz(1931)}$ | 75 |
| 4.11 | Mahalanobis-Ellipsen der Abgleichergebnisse aller Probanden: Versuchsszenario VS1 bis VS7. | 77 |
| 4.12 | Streuungsellipsen der Intra- und Interbeobachterstreuung . . . | 80 |
| 4.13 | Farbörter der Abgleichergebnisse zur Untersuchung der Intra- beobachterstreuung | 81 |
| 4.14 | Abgleichergebnisse der Probandin ohne 2°-10°-Differenz: Ver- suchsszenarien VS1, VS4, VS5 und VS7 | 83 |
| 4.15 | Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1964)}$ und Farbörter der Abgleichergebnisse G | 84 |
| 4.16 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz(CIE1964)}$ | 85 |
| 4.17 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz}$: Vergleich der Normspektralwertfunktionen CIE1931 und CIE1964 mit den Spektralwertfunktionen CIE2006 | 86 |
| 4.18 | Vergleich der Farbraumfehlabbildungsvektoren unter Verwen- dung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und 2006-UP . . . | 87 |
| 4.19 | Darstellung der Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE1964, 2006- TUIL und CIE2006 | 90 |
| 4.20 | Spektralfarbenzüge im $u'v'$ -Diagramm basierend auf den Spek- tralwertfunktionen CIE1931, CIE1964, 2006-TUIL und CIE2006 . | 91 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.21 | Farbörter der LEDs der Testlichtquelle TLG in den unterschiedlichen UCS-u'v'-Farbtafeln für einen 2°-Standardbeobachter. . . | 92 |
| 4.22 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ und $\Delta u'v'_{G-Referenz}$: Vergleich der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen | 94 |
| 4.23 | Leuchtdichte auf der Referenzlichtfläche und auf der von den Probanden angeglichenen Testlichtfläche | 96 |
| 4.24 | Wahrgenommene Inhomogenität der Testfelder | 97 |
| 4.25 | Vergleich der Abgleichergebnisse (Referenzlichtquelle oben/ Referenzlichtquelle unten) | 99 |
| 4.26 | Versuchsablauf der Tests zur Untersuchung der Wahrnehmbarkeit der Verbesserung durch die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL. | 108 |
| 4.27 | Box-Whisker-Plots der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} : VS1 bis VS7 (2°-Beobachterfeld) | 110 |
| 4.28 | Box-Whisker-Plots der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} : VS1 bis VS7 (10°-Beobachterfeld) | 111 |
| 4.29 | Zusammenhang zwischen $\Delta u'v'_{K-Referenz}$ bzw. $\Delta u'v'_{G-Referenz}$ und ΔE_{sub} | 117 |
| 4.30 | Farbörter des Lichtfarbensatzes 2 | 119 |
| 4.31 | Box-Whisker-Plots der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} : VS1, VS8 und VS9 (2°-Beobachterfeld) | 121 |
| 4.32 | Box-Whisker-Plots der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} : VS1, VS8 und VS9 (10°-Beobachterfeld) | 122 |
| 5.1 | Schematische Darstellung möglicher Betrachtungswinkel unter denen zwei Boards in der Flugzeugkabine beobachtet werden können. | 129 |
| 5.2 | Ergebnisschema der Abgleichergebnisse - $\Delta u'v'_{K-G}$ | 130 |
| 5.3 | Farbdifferenzen $\Delta u'v'_{K-G}$: Versuchsszenarien VS1 bis VS7 - ermittelt mit Spektralwertfunktionen CIE1931 (links) und 2006-TUIL-2°(rechts) | 131 |
| 5.4 | Schematische Darstellung des Rechenwegs zur direkten Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. | 135 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.5 | Schematische Darstellung des Rechenwegs zur Berechnung des Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit über das Differenzspektrum. | 137 |
| 5.6 | Relative spektrale Änderungsempfindlichkeitsfunktionen . . . | 140 |
| 5.8 | Box-Whisker-Plots der subjektiv wahrgenommenen Farbdifferenzen $\Delta E_{sub:MIB}$ | 148 |
| A.1 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei 3500 K | 162 |
| A.2 | Referenz- und Testlichtspektren der Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei 5000 K | 163 |
| A.3 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei 6500 K | 164 |
| A.4 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für Testfarbe TF1 | 165 |
| A.5 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für Testfarbe TF2 | 166 |
| A.6 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für Testfarbe TF3 | 167 |
| A.7 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für Testfarbe TF4 | 168 |
| A.8 | Referenz- und Testlichtspektren: Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 für Testfarbe TF5 | 169 |
| A.9 | Mittelwerte der Abgleichergebnisse K, M, G für Versuchsszenarien VS1-VS3 und VS5-VS7. | 173 |
| A.10 | Abgleichergebnisse der Probandin ohne 2°-10°-Differenz: Versuchsszenarien VS2, VS3 und VS6 | 176 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Zuordnung zwischen Skalenwert und Beschreibung des wahrgenommenen Farbabstandes | 33 |
| 3.2 | LEDs der 8-LED-Vollspektrum-Lichtquelle | 40 |
| 3.3 | Ansteuerung der Testlichtquelle über die Pfeiltasten. | 42 |
| 3.4 | Referenz- und Testlichtquellen:VS1 bis VS9 | 45 |
| 3.5 | Zusammensetzung der verwendeten Referenz- und Testlichtquellen. | 45 |
| 3.6 | Peakwellenlängen λ_{peak} und Halbwertsbreiten λ_{FWHM} der einzelnen LED-Komponenten. | 46 |
| 3.7 | u'v'-Koordinaten aller untersuchten Lichtfarben. | 50 |
| 4.1 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K/G-Referenz(1931)}$ | 72 |
| 4.2 | Achsenabschnitte a,b der Interbeobachterstreuungsellipsen . . . | 76 |
| 4.3 | Achsenabschnitte a,b der Intrabeobachterstreuungsellipsen . . . | 79 |
| 4.4 | Farbörter der LEDs der Testlichtquelle TLG in den unterschiedlichen u'v'-UCS-Farbtafeln | 93 |
| 4.5 | Farbabstände $\Delta u'v'_{K(Ref\ oben)-K(Ref\ unten)}$ | 100 |
| 4.6 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz'}$ wahrgenommene Farbdifferenzen ΔE_{sub} und Signifikanzbewertung (2°-Beobachterfeld) . . . | 114 |
| 4.7 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz'}$ wahrgenommene Farbdifferenzen ΔE_{sub} und Signifikanzbewertung (10°-Beobachterfeld) . . . | 115 |
| 4.8 | Zuordnung der wahrgenommenen Farbdifferenzen ΔE_{sub} zu $\Delta u'v'$ -Werten | 117 |
| 4.9 | Anzahl der signifikanten Verringerungen der wahrgenommenen Farbdifferenzen | 123 |
| 5.1 | Farbabstände $\Delta u'v'_{K-G}$: Vergleich der Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE1964 und 2006-TUIL | 133 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.2 | $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ/10^\circ)}$ -Werte für alle Kombinationen der verwendeten Testlichtquellen | 142 |
| 5.3 | $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ/10^\circ)}$ -Werte im Vergleich zu subjektiven Farbdifferenzbewertungen $\Delta E_{sub(2^\circ/10^\circ)}$ | 149 |
| A.1 | Leuchtdichten der Referenzlichtquellen | 171 |
| A.2 | Standardabweichung der Farbörter der Referenzlichtquellen . . | 172 |
| A.3 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K-Referenz}$: Vergleich der Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE2006-2°, 2006-UP-2° und 2006-TUIL-2° . . . | 174 |
| A.4 | Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G-Referenz}$: Vergleich der Spektralwertfunktionen CIE1964, CIE2006-10° und 2006-TUIL-10° | 175 |
| A.5 | t-Werte für Signifikanztest: Verringerung der Farbraumfehler durch Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° . | 177 |
| A.6 | t-Werte für Signifikanztest: Verringerung der Farbraumfehler durch Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° | 178 |
| A.7 | 95%-Perzentile der Farbabstände $u'v'_{K-Referenz}$ | 178 |
| A.8 | 95%-Perzentile der Farbabstände $u'v'_{G-Referenz}$ | 178 |
| A.9 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$ | 180 |
| A.10 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$ | 180 |
| A.11 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ)$ | 181 |
| A.12 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$ | 181 |
| A.13 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$ | 182 |
| A.14 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ)$ | 182 |
| A.15 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$ | 183 |
| A.16 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1931)$ | 184 |
| A.17 | T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypothese: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 2^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 2^\circ)$ | 184 |

| | |
|--|-----|
| A.18 T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypo- these: $\Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$ | 185 |
| A.19 T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypo- these: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE1964)$ | 185 |
| A.20 T- und T'-Werte für Wilcoxon Test zur Überprüfung der Hypo- these: $\Delta E_{sub}(2006 - TUIL - 10^\circ) < \Delta E_{sub}(CIE2006 - 10^\circ)$ | 186 |
| A.21 Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° | 187 |
| A.22 Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-10° | 197 |

Abkürzungen und Symbole

| Abkürzung | Bedeutung |
|--------------------|--|
| 2006-UP-2° | Zusatz für Kennzeichnung der Sehzapfen-Grundfunktionen für ein 2°- Beobachterfeld, entwickelt an der Universität von Pannonia |
| 2006-TUIL-2° | Zusatz für Kennzeichnung der Sehzapfen-Grundfunktionen für ein 2°- Beobachterfeld, entwickelt an der TU Ilmenau |
| 2006-TUIL-10° | Zusatz für Kennzeichnung der Sehzapfen-Grundfunktionen für ein 10°- Beobachterfeld, entwickelt an der TU Ilmenau |
| 8-LED-Lichtquelle | Testlichtquelle mit 8 LEDs unterschiedlicher Farbe, die einzeln angesteuert werden können |
| 8-LED-Vollspektrum | LED-Mischspektrum ohne ausgeprägte Peaks und Täler in der Spektralverteilung |
| A | amberfarbene Rebel LED des Herstellers Lumileds |
| Abgleichergebnis K | Abgleichergebnis aus 2°-Beobachterfeld |
| Abgleichergebnis M | Abgleichergebnis aus 5°-Beobachterfeld |
| Abgleichergebnis G | Abgleichergebnis aus 10°-Beobachterfeld |
| ACB-Mix | Amber, Cyan, Clau - LED-Mischspektrum |
| B | blaue Advanced-Power-Topled LED des Herstellers Osram OS |
| C | cyanfarbene Rebel LED des Herstellers Lumileds |
| CB | leuchtstoffkonvertierte blaue Power-Topled LED des Herstellers Osram OS |
| CCT | Correlated Color Temperature - ähnlichste Farbtemperatur |

| Abkürzung | Bedeutung |
|-------------|--|
| CIE | Commission Internationale de l'Eclairage |
| CIE1931 | Zusatz für Kennzeichnung der Normspektralwertfunktionen des CIE Standards von 1931 |
| CIE1964 | Zusatz für Kennzeichnung der Normspektralwertfunktionen des CIE Standards von 1964 |
| CIE2006-2° | Zusatz für Kennzeichnung der Sehzapfen-Grundfunktionen für ein 2°-Beobachterfeld, entsprechend der CIE Empfehlung CIE170-1:2006 |
| CIE2006-10° | Zusatz für Kennzeichnung der Sehzapfen-Grundfunktionen für ein 10°-Beobachterfeld, entsprechend der CIE Empfehlung CIE170-1:2006 |
| CW | leuchtstoffkonvertierte warmweiße Power-Topled LED des Herstellers Osram OS |
| CY | leuchtstoffkonvertierte gelbe Advanced-Power-Topled LED des Herstellers Osram OS |
| G | grüne Advanced-Power-Topled LED des Herstellers Osram OS |
| LED | Light Emitting Diode - Licht emittierende Diode |
| LED-Typ T1 | weiße LED mit Blaupeak bei 440 nm |
| LED-Typ T2 | weiße LED mit Blaupeak bei 460 nm |
| L-Zapfen | Photosensor mit maximaler spektraler Empfindlichkeit im Bereich langer Wellenlängen |
| max. | maximal |
| MIB | Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit |
| M-Zapfen | Photosensor mit maximaler spektraler Empfindlichkeit im Bereich mittlerer Wellenlängen |
| N | nicht signifikant |

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------------------|---|
| P | Proband |
| POI | Point of Interest - zu untersuchender Zielfarbort |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| R | rote Power-Topled LED des Herstellers Osram OS |
| RCBW-Mix | Rot, Cyan, Blau, Weiß - LED-Mischspektrum |
| Ref | Referenz |
| rel. | relative |
| RGBW | red, green, blue, white - Rot, Grün, Blau, Weiß - Kombination farbiger Lichtquellen |
| RGB-Modus | Drei-LED-Komponenten-Mischalgorithmus (typischerweise Rot, Grün, Blau) |
| RGBW-Modus | Vier-LED-Komponenten-Mischalgorithmus (typischerweise Rot, Grün, Blau, Weiß) |
| S | signifikant |
| spek. | spektrale |
| S-Zapfen | Photosensor mit maximaler spektraler Empfindlichkeit im Bereich kurzer Wellenlängen |
| TF | Testfarbe |
| TLG | grünliche Testlichtquelle - LED Typ T2 und Rot-Grün-Blau-LEDs |
| TLR | rötliche Testlichtquelle - LED Typ T1 und Rot-Grün-Blau-LEDs |
| TLR-Cyan-Mix-RGBW | RGBW-Mischung der TLR, bei der die grüne LED mit einer cyanfarbenen LED ersetzt wird |
| TLR-RGBW+C | RGBW-Mischung der TLR mit einem konstanten Mischanteil einer cyanfarbenen LED |
| UCS- $u'v'$ -Farbraum | gleichabständiger Farbraum, basierend auf den Farbkoordinaten u', v' , der CIE von 1976 |
| vgl. | vergleiche |
| VS | Versuchsszenario |

| Symbol | Bedeutung |
|-----------------------------------|--|
| $a_{u'v'}$ | Achsenabschnitt der Streuungsellipse als Farbabstand im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| a/b | Achsenverhältnis der Streuungsellipse |
| α | Signifikanzniveau |
| $b_{u'v'}$ | Achsenabschnitt der Streuungsellipse als Farbabstand im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| $\beta(\lambda)$ | spektraler Reflexionsgrad |
| C | Kovarianzmatrix |
| C^{-1} | inverse Kovarianzmatrix |
| d_i | Differenz zwischen den Rangzahlen zueinandergehöriger Wertepaare |
| df | Freiheitsgrad für t-Test-Tabelle |
| ΔE_{*a*b*} | Farbabstand im CIELAB-Farbraum 1976 |
| ΔE_{sub} | subjektive Farbdifferenzbewertung (Werte zwischen 0 und 8) |
| $\vec{F}_R, \vec{F}_G, \vec{F}_B$ | Farbvalenzen der roten, grünen und blauen LED |
| γ | Neigungswinkel der Mahalanobis-Ellipse |
| H_0 | Nullhypothese |
| H_1 | zu testende Hypothese |
| I_{Nutz} | Nutzstrom |
| k | Anzahl der Ziehungen mit Zurücklegen aus einer Stichprobe |
| L | Leuchtdichte in cd/m^2 |
| L_{imax} | maximale Leuchtdichte der roten (i=R), grünen (i=G) und blauen (i=B) LED |
| λ | Wellenlänge |
| λ_{Peak} | Peakwellenlänge einer Spektralverteilung |
| λ_{FWHM} | Halbwerts-Wellenlänge der Spektralverteilung einer farbigen LED (FWHM: Full Width at Half Maximum) |
| L, M, S | Farbwerte des LMS-Valenzsystems |

| Symbol | Bedeutung |
|--|--|
| $\bar{l}_i(\lambda), \bar{m}_i(\lambda), \bar{s}_i(\lambda)$ | Sehzapfen-Grundfunktionen entsprechend der CIE Empfehlung 170-1:2006 (i=CIE2006-2°/-10°), weiterentwickelt an der Universität von Pannonia (i=2006-UP-2°) und weiterentwickelt an der TU Ilmenau (i=2006-TUIL-2°/-10°) |
| M | Matrix |
| M^{-1} | inverse Matrix |
| m | Anzahl der Paardifferenzen |
| md | Mahalanobis-Distanz |
| μ | Mittelwert der Population |
| n | Stichprobenumfang |
| p | Irrtumswahrscheinlichkeit für Hypothesentest |
| $Prozent_i$ | prozentuale Ansteuerwerte der roten (i=R), grünen (i=G) und blauen (i=B) LED |
| r_s | Korrelationskoeffizient nach Spearman |
| $\rho_{u'v'}$ | Korrelationskoeffizient für die Korrelation zwischen u'- und v'-Werten der Abgleichergebnisse |
| $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ | Spektralwertfunktionen des RGB-Normvalenzsystems |
| $S(\lambda)$ | spektrale Strahldichtevertelung |
| $S_{diff}(\lambda)$ | Differenzspektrum zwischen $S2_{mix}(\lambda)$ und $S1_{mix}(\lambda)$ |
| $S1_{mix}(\lambda), S2_{mix}(\lambda)$ | Metamere Spektren aus unterschiedlichen RGBW-LED-Systemen |
| σ | Standardabweichung |
| $\hat{\sigma}$ | Standardfehler |
| t | t-Wert für die Signifikanzanalyse |
| $\tau(\lambda)$ | spektraler Transmissionsgrad |
| u', v', w' | Farbwertanteile der CIE-UCS-u'v'w'-Farbtafel 1976 |
| u'_i, v'_i | Farbkoordinaten der roten (i=R), grünen (i=G) und blauen (i=B) LED im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |

| Symbol | Bedeutung |
|---|---|
| u'_{POI}, v'_{POI} | Farbkoordinaten des Point of Interest im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| $\Delta u'v'$ | Farbabstand im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| $\Delta u'v'_{K-G}$ | Farbabstand zwischen Abgleichergebnis K und Abgleichergebnis G im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| $\Delta u'v'_{K/M/G-Referenz}$ | Farbabstand zwischen Abgleichergebnis K/M/G und der Referenzlichtquelle im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| $\Delta u'v'_{K/G(Ref\ oben)-K/G(Ref\ unten)}$ | Farbabstand zwischen den Abgleichergebnissen aus Untersuchungen mit der Referenzlichtquelle oben und der Referenzlichtquelle unten im UCS-u'v'-Farbraum 1976 |
| $\Delta u'v'_{MIB}$ | Farbdifferenz, im UCS-u'v'-Farbraum 1976, die sich allein aufgrund einer Beobachterfeldgrößenänderung zwischen zwei vormals metameren Spektren ergibt - gleichzusetzen mit dem Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit |
| $\Delta u'v'_{MIB(2^\circ 10^\circ)}$ | $\Delta u'v'_{MIB}$ für einen konkreten Wechsel zwischen 2°- und 10°-Beobachterfeld |
| $\Delta u'_{emp f}(\lambda) \Delta v'_{emp f}(\lambda)$ | spektrale Änderungsempfindlichkeitsfunktionen, die beschreiben wie stark der Farbabstand $\Delta u'v'_{MIB}$ auf Spektraldifferenzen zwischen zwei Spektren reagiert |
| u'_i, v'_i, L_i | Eingangsparameter der roten (i=R), grünen (i=G), blauen (i=B) LED für Mischalgorithmus |
| $V(\lambda)$ | Hellempfindlichkeitskurve für photopisches Sehen |
| $V_{Sharpe}(\lambda)$ | Neue Hellempfindlichkeitskurve für photopisches Sehen, basierend auf den neuen Sehzapfen-Grundfunktionen für einen 2°-Beobachter nach L. Sharpe und A. Stockman |

| Symbol | Bedeutung |
|--|--|
| $V_{Sharpe-10^\circ}(\lambda)$ | Neue Hellempfindlichkeitskurve für photopisches Sehen, basierend auf den neuen Sehzapfen-Grundfunktionen für einen 10°-Beobachter nach L. Sharpe und A. Stockman |
| \bar{x} | Mittelwert der Stichprobe |
| x, y, z | Farbwertanteile des XYZ-Normvalenzsystems |
| X, Y, Z | Farbwerte des XYZ-Normvalenzsystems |
| X_i, Y_i, Z_i | Farbwerte der roten (i=R), grünen (i=G) und blauen (i=B) LED im XYZ-Normvalenzsystems |
| $X_{POI}, Y_{POI}, Z_{POI}$ | Farbwerte des Point of Interest im XYZ-Normvalenzsystems |
| $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ | Einheitsvektoren des XYZ-Normvalenzsystems |
| $\bar{x}_i(\lambda), \bar{y}_i(\lambda), \bar{z}_i(\lambda)$ | Normspektralwertfunktionen des CIE Standards von 1931 (i=CIE1931) oder 1964 (i=CIE1964) |
| $\bar{x}_i(\lambda), \bar{y}_i(\lambda), \bar{z}_i(\lambda)$ | Spektralwertfunktionen basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen $\bar{l}_i(\lambda), \bar{m}_i(\lambda), \bar{s}_i(\lambda)$ |

Literaturverzeichnis

- [BCS07] BIESKE, K. ; CSUTI, P. ; SCHANDA, J.: Colour Appearance of metameric lights and possible colorimetric description. In: *CIE Expert Symposium on Visual Appearance*, 2007
- [BL03] BORTZ, J. ; LIENERT, G.: *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung*. 2. Auflage. Springer-Verlag, 2003
- [BM49] BROWN, W. ; MACADAM, D.: Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences. In: *Journal of the Optical Society of America* 39 (1949), S. 808–834
- [Bor05] BORTZ, J.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6. Auflage. Springer Medizin Verlag, 2005
- [Bro57] BROWN, W.: Color Discrimination of Twelve Observers. In: *Journal of the Optical Society of America* 47 (1957), S. 137–143
- [BS04] BORBÉLY, Á. ; SCHANDA, J.: Colour Matching Using LEDs as Primaries. In: *COLOR research and application* 29 (2004), S. 360–364
- [BS09] BRAINARD, D. ; STOCKMAN, A.: Colorimetry. In: BASS, M. (Hrsg.) ; DECUSATIS, C. (Hrsg.) ; ENOCH, J. (Hrsg.) ; LAKSHMINARAYANAN, V. (Hrsg.) ; LI, G. (Hrsg.) ; MACDONALD, C. (Hrsg.) ; MAHAJAN, V. (Hrsg.) ; STRYLAND, E. van (Hrsg.): *The Optical Society of America Handbook of Optics* Bd. Volume III: Vision and Vision Optics. 3rd edition. MacGraw Hill, 2009
- [Che08] CHERNICK, M.: *Bootstrap Methods A Guide for Practitioners and Researchers*. John Wiley & Sons Inc., 2008
- [CIE31] CIE1931: Colorimétrie, Resolutions 1-4. In: *Recueil des travaux et compte rendu des séances, Hutième Session Cambridge*, The National Physical Laboratory Teddington, Cambridge at the University Press, 1931, S. 19–29

- [CIE63] CIE1964: Offizielle Empfehlungen, Komitee E-1.3.1. - Farbmessung. In: *15. Hauptversammlung in Wien*, CIE Publication 11 A, 1963, S. 37
- [Cra65] CRAWFORD, B.: Colour Matching and Adaptation. In: *Vision Research* 5 (1965), S. 71–78
- [CS08] CSUTI, P. ; SCHANDA, J.: Colour Matching Experiments with RGB-LEDs. In: *Color research and application* 33 (2008), S. 108–112
- [CS09] CSUTI, P. ; SCHANDA, J.: A Better Description of Metameric Experience of LED Clusters. In: *CIE Meeting Budapest: Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting*, 2009
- [CSP⁺11] CSUTI, P. ; SCHANDA, J. ; PETLURI, R. ; MCGRODDY, K. ; HARBERS, G.: Improved color matching functions for better visual matching of LED sources. In: *CIE 27th Session - Sun City/ZA - Proceedings*, 2011
- [DVDV93] DE VALOIS, R. ; DE VALOIS, K.: A Multi-Stage Color Model. In: *Vision Research* 33 (1993), Nr. 8, S. 1053–1065
- [DVDV95] DE VALOIS, R. ; DE VALOIS, K.: On 'A Three-Stage Color Model'. In: *Vision Research* 36 (1995), Nr. 6, S. 833–836
- [Fai05] FAIRCHILD, M.: *Color Appearance Models*. 2. John Wiley & Sons, Ltd, 2005
- [FHC08] FOTIOS, S. ; HOUSER, K. ; CHEAL, C.: Counterbalancing needed to avoid bias in side-by-side brightness matching tasks. In: *Leukos* 4 (2008), Nr. 4, S. 207–223
- [FR95] FAIRCHILD, M. ; RENIFF, L.: Time course of chromatic adaptation for color-appearance judgements. In: *Journal of the Optical Society of America A* 12 (1995), Nr. 5, S. 824–833
- [Gal07] GALL, D.: *Grundlagen der Lichttechnik*. Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG, 2007
- [Gui31] GUILD, J.: The Colorimetric Properties of the Spectrum. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 230 (1931), S. 149–187

- [Hel52] HELMHOLTZ, J.C.: On the Theory of Compound Colours. In: *Philosophical Magazine Series 4* 4 (1852), S. 519–534
- [Her20] HERING, E.: *Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn*. Springer Verlag, 1920
- [Hun95] HUNT, R.W.G.: *The Reproduction of Colour*. Fountain Press, 1995
- [Jud49] JUDD, D.: A Comparison of Direct Colorimetry of Titanium Pigments with Their Indirect Colorimetry Based on Spectrophotometry and a Standard Observer. In: *Journal of the Optical Society of America* 39 (1949), Nr. 11, S. 945–950
- [Jud59] JUDD, D.: Committee W-1.3.1. - Colorimetry. In: *Proceedings of the CIE Session Bruxelles*, 1959
- [KGBS05] KUTAS, G. ; GÓCZA, K. ; BODROGI, P. ; SCHANDA, J.: Colour size effect. In: *AIC Colour 05 - 10th Congress of the International Colour Association*, 2005
- [Kol03] KOLB, H.: How the Retina Works. In: *American Scientist* 91 (2003), S. 28–35
- [LAN] *Lanthony's desaturated 15 Hue test, Luneau Ophthalmologie. : Lanthony's desaturated 15 Hue test, Luneau Ophthalmologie*
- [LL07] LUO, R. ; LI, C: CIE Color Appearance Models and Associated Color Spaces. In: SCHANDA, J. (Hrsg.): *Colorimetry: Understanding the CIE System*. John Wiley & Sons Inc., 2007, S. 261–294
- [Mac42] MACADAM, D.: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight. In: *Journal of the Optical Society of America* 32 (1942), Nr. 5, S. 247–274
- [Max60] MAXWELL, J.C.: On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum. In: *Proceedings of the Royal Society of London* Bd. 10, 1860, S. 404–409
- [MMP07] MCKEEFRY, D. ; MURRAY, I. ; PARRY, N.: Perceived shifts in saturation and hue of chromatic stimuli in the near peripheral retina. In: *Journal of the Optical Society of America A* 24 (2007), S. 3168–3179
- [Naw13] NAWRI, N.: *Berechnung von Kovarianzellipsen*. wwwhep.physik.uni-freiburg.de/fp/origin/, Juni 2013

- [NY65] NIEMEROFF, I. ; YUROW, J.A.: Degree of Metamerism. In: *Journal of the Optical Society of America* 55 (1965), Nr. 2, S. 185–190
- [OLRR09] OICHERMAN, B. ; LUO, R. ; RIGG, B. ; ROBERTSON, A.: Adaptation and Colour Matching of Display and Surface Colours. In: *Color research and application* 34 (2009), S. 182–193
- [OR05] OHTA, N. ; ROBERTSON, A.R. ; KRISS, M.A. (Hrsg.): *Colorimetry Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2005
- [OW75a] OHTA, N. ; WYSZECKI, G.: Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers due to a change from CIE Illuminant D65 to C. In: *Journal of the Optical Society of America* 65 (1975), Nr. 10, S. 1152–1153
- [OW75b] OHTA, N. ; WYSZECKI, G.: Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers viewed under different illuminants. In: *Journal of the Optical Society of America* 65 (1975), Nr. 3, S. 327–333
- [PMM06] PARRY, N. ; MCKEEFRY, D. ; MURRAY, I.: Variant and invariant color perception in the near peripheral retina. In: *Journal of the Optical Society of America A* 23 (2006), S. 1586–1597
- [Pri11] PRIDMORE, R.: Complementary Colors Theory of Color Vision: Physiology, Color Mixture, Color Constancy and Color Perception. In: *Color research and application* 36 (2011), Nr. 6, S. 394–412
- [PS76] POKORNY, J. ; SMITH, V.: Effect of field size on red-green color mixture equations. In: *Journal of the Optical Society of America* 66 (1976), S. 705–708
- [PSS76] POKORNY, J. ; SMITH, V. ; STARR, S.: Variability of Color Mixture Data - II. The Effect of Viewing Field Size on The Unit Coordinates. In: *Vision Research* 16 (1976), S. 1095–1098
- [RG00] RINNER, O. ; GEGENFURTNER, K.: Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. In: *Vision Research* 40 (2000), S. 1813–1826
- [Rum10] RUMSEY, Deborah: *Statistik für Dummies*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2010
- [SAV⁺11] SARKAR, A. ; AUTRUSSEAU, F. ; VIÉNOT, F. ; LE CALLET, P. ; BLONDÉ, L.: From CIE 2006 physiological model to improved age-dependent

- and average colorimetric observers. In: *Journal of the Optical Society of America A* 28 (2011), S. 2033–2048
- [SB59] STILES, W. ; BURCH, J.: N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958). In: *Optica Acta* 6 (1959), S. 1–26
- [SB09] STOCKMAN, A. ; BRAINARD, D.: Color vision mechanism. In: BASS, M. (Hrsg.) ; DeCusatis, C. (Hrsg.) ; Enoch, J. (Hrsg.) ; Lakshminarayanan, V. (Hrsg.) ; Li, G. (Hrsg.) ; MacDonald, C. (Hrsg.) ; Mahajan, V. (Hrsg.) ; Stryland, E. van (Hrsg.): *The Optical Society of America Handbook of Optics Bd. Volume III: Vision and Vision Optics*. 3rd edition. MacGraw Hill, 2009
- [Sch20] SCHRÖDINGER, E.: Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. In: *Annalen der Physik* 63 (1920), S. 397–426
- [Sch07] SCHANDA, J. ; SCHANDA, J. (Hrsg.): *Colorimetry - Understanding the CIE System*. John Wiley & Sons, Inc., 2007
- [SF02] SHAW, M. ; FAIRCHILD: Evaluating the 1931 CIE Color Matching Functions. In: *Color research and application* 27 (2002), S. 316–329
- [SG32] SMITH, T. ; GUILD, J.: The C.I.E. Colorimetric Standards and Their Use. In: *Transactions of the Optical Society* 33 (1931-32), S. 78–134
- [SPS76] SMITH, V. ; POKORNY, J. ; STARR, S.: Variability of Color Mixture Data - I. Interobserver Variability in the Unit Coordinates. In: *Vision Research* 16 (1976), S. 1087–1094
- [SS99] STOCKMAN, A. ; SHARPE, L.: Cone spectral sensitivities and color matching. In: GEGENFURTNER, K. (Hrsg.) ; SHARPE, L. (Hrsg.): *Color vision: from genes to perception*. Cambridge University Press, 1999, S. 53–87
- [SS00] STOCKMAN, A. ; SHARPE, L.: The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. In: *Vision Research* 40 (2000), S. 1711–1737
- [SS06] STOCKMAN, A. ; SHARPE, L.: Physiologically-Based Colour Matching Functions. In: *ISS/CIE Expert Symposium "75 Years of the CIE Standard Colorimetric Observer"*, 2006

- [SSF99] STOCKMAN, A. ; SHARPE, L. ; FACH, C.: The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches. In: *Vision Research* 39 (1999), S. 2901–2927
- [SSJJ05] SHARPE, L. ; STOCKMAN, A. ; JAGLA, W. ; JÄGLE, H.: A luminous efficiency function for daylight adaptation. In: *Journal of Vision* 5 (2005), S. 948–968
- [SSJJ11] SHARPE, L. ; STOCKMAN, A. ; JAGLA, W. ; JÄGLE, H.: A Luminous Efficiency Function for Daylight Adaptation: A Correction. In: *Color research and application* 36 (2011), Nr. 1, S. 42–46
- [SSJN99] SHARPE, L. ; STOCKMAN, A. ; JÄGLE, H. ; NATHANS, J.: Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness. In: GEGENFURTNER, K. (Hrsg.) ; SHARPE, L. (Hrsg.): *Color vision: From Genes to Perception*. Cambridge University Press, 1999, S. 3–52
- [Sti55] STILES, W.: Interim Report to the Commission Internationale de 'Eclairage, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's investigation of colour-matching (1955). In: *Optica Acta* 2 (1955), S. 168–181
- [Sto04] STOCKMAN, A.: *Colorimetry. Encyclopedia of Applied Physics*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2004
- [Sto13] STOCKMAN, A.: CIE (2012) 2-deg XYZ "physiologically-relevant" colour matching functions. www.cvrl.org, Juni 2013
- [SVB08] SCHIERZ, C. ; VANDAHN, C. ; BIESKE, K.: *Untersuchungen zur physiologischen Wahrnehmung von Leuchtdichte- und Farbinhomogenitäten bei Flächenstrahlern*. 2008. – Forschungsbericht. TU Ilmenau
- [SW62a] STILES, W. ; WYSZECKI, G.: Counting Metameric Object Colors. In: *Journal of the Optical Society of America* 52 (1962), Nr. 3, S. 313–328
- [SW62b] STILES, W. ; WYSZECKI, G.: Field Trials of Color-Mixture Functions. In: *Journal of the Optical Society of America* 52 (1962), S. 58–75
- [TC-04] TC-1-48: CIE 15:2004: Colorimetry / Commission Internationale de l'Eclairage. 2004. – Forschungsbericht
- [TC-06] TC-1-36: CIE 170-1:2006: Fundamental Chromaticity Diagram with Pysiological Axes - Part 1 / Commision Internationale de

- l'Eclairage. 2006. – Forschungsbericht
- [Tho98] THORNTON, W.: How Strong Metamerism Disturbs Color Spaces. In: *Color research and application* 23 (1998), S. 402–407
- [Val05] VALBERG, A.: *Light Vision Color*. John Wiley & Sons Ltd., 2005
- [Vel64] VELHAGEN, K.: *Tafeln zur Prüfung des Farbsinns*. Stuttgart : Georg-Thieme-Verlag, 1964
- [WF71] WYSZECKI, G. ; FIELDER, G.: New Color-Matching Ellipses. In: *Journal of the Optical Society of America* 61 (1971), S. 1135–1152
- [WM88] WEBSTER, M. ; MACLEOD, D.: Factors underlying differences in the color matches of normal observers. In: *Journal of the Optical Society of America A* 5 (1988), Nr. 10, S. 1722–1735
- [Wri46] WRIGHT, W.D.: *The measurement of Colour*. Adam Hilger Ltd., 1946
- [Wri75] WRIGHT, W.: The colour perception process. In: *Lighting Research and Technology* 7 (1975), Nr. 3, S. 155–158
- [Wri07] WRIGHT, W.: Professor Wright's Paper from the Golden Jubilee Book: The Historical and Experimental Background to the 1931 CIE System of Colorimetry. In: SCHANDA, J. (Hrsg.): *Colorimetry: Understanding the CIE System*. John Wiley & Sons Inc., 2007, S. 9–23
- [Wri29] WRIGHT, W.: A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. In: *Transactions of the Optical Society* 30 (1928-29), Nr. 4, S. 141–164
- [WS00] WYSZECKI, G. ; STILES, W.S.: *Color Science Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [Wu09] WU, C.: A Multi-Stage Neural Network Model for Human Color Vision. In: *Advances in Neural Networks - ISNN 2009*, 2009, S. 502–511
- [WV99] WOLD, J. ; VALBERG, A.: General method for deriving an XYZ tristimulus space exemplified by use of Stiles-Burch(1955) 2° color matching data. In: *Journal of the Optical Society of America A* 16 (1999), S. 2845–2858
- [WV01] WOLD, J. ; VALBERG, A.: The Derivation of XYZ Tristimulus Spaces: A Comparison of Two Alternative Methods. In: *Color research and*

- application* 26 (2001), S. 222–224
- [WW60] WRIGHT, H. ; WYSZECKI, G.: Field Trial of 10° Color-Mixture Functions. In: *Journal of the Optical Society of America* 50 (1960), S. 647–650
- [Wys59] WYSZECKI, G.: A Measure for the Total Difference of Two Sets of Color-Mixture Functions. In: *Journal of the Optical Society of America* 49 (1959), Nr. 8, S. 811–814
- [You02] YOUNG, T.: On the Theory of Light and Colours. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 92 (1802), S. 12–48
- [Zol99] ZOLLINGER, H.: *Color - A Multidisciplinary Approach*. Verlag Helvetica Chimica Acta, 1999